

PROPOSTA DE CATÁLOGO DE SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO ACÚSTICA À BASE DE PAINÉIS COMPÓSITOS DE MADEIRA E CIMENTO

SÉRGIO MANUEL FURTADO GONÇALVES SEQUEIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES CIVIS

Professor Doutor Rui Manuel Gonçalves Calejo Rodrigues

Engenheira Dóris Mafalda Dias Queirós

JUNHO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2015/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

A ciência é a aproximação progressiva do Homem com o mundo real

Max Planck

AGRADECIMENTOS

Na presente dissertação quero manifestar o meu profundo agradecimento a todos aqueles que apoiaram e intervieram diretamente ou indiretamente no meu percurso académico.

Agradeço ao meu orientador, o Professor Doutor Rui Calejo, pela sua disponibilidade, incentivo e pelos constantes desafios que me foi apresentando a fim de superar as expectativas.

À Eng.^a Dóris Queirós, a minha co-orientadora, pela enorme dedicação e atenção que me prestou no decorrer dos ensaios, reuniões e da redação da dissertação.

À empresa Viroc Portugal, na pessoa do Eng.º José Pinheiro Soares, pela colaboração e por prestarem os painéis compósitos de madeira e cimento Viroc utilizados nos ensaios laboratoriais.

À empresa Flex2000, na pessoa do Eng.º Jorge Fernandes, por prestarem os materiais resilientes Aglomex utilizados nos ensaios laboratoriais.

À empresa Marshall Day Acoustics, agradecimento especial ao Eng.º Keith Ballagh, pela partilha de informação sobre modelos teóricos de previsão e caracterização do isolamento sonoro e facilitação de uma chave temporária para o software Insul.

Ao NIDEA e ao Eng.º Eduardo Costa pelo apoio nos ensaios laboratoriais.

Aos meus pais, irmão e avós pela educação que me transmitiram, pelos esforços que fizeram para assegurarem um futuro melhor e pela alegria e orgulho que sempre me deram e continuam a dar.

À minha restante família, pelos votos de felicidade e de sucesso e pela ajuda que nunca me negaram.

Aos meus amigos, sentirei bastante saudade dos nossos momentos de estudo, de festa, do café do almoço, da (quase) constante brincadeira e piadas. Agradeço a vós que tanto animaram estes cinco fantásticos anos: Danilo, José Miguel, Rui, Gabriel, Daniel, Néilson, José Rocha, Carlos, Walter, Jorge, Santos.

RESUMO

Atualmente a acústica tem um peso substancial na saúde e no conforto. É notória a consciência para este facto na medida em que os impactos negativos devidos ao ruído aumentam e são cada vez mais fáceis de serem identificados. Como consequência o nível das exigências por parte dos utilizadores tem um crescimento progressivo e o desenvolvimento tecnológico da construção tende a responder à procura.

Numa cidade como o Porto a ação de reabilitar é essencial para manter o património histórico que representa várias épocas e a evolução social, cultural e económica da cidade. A casa clássica do Porto burguês é um dos símbolos históricos que se observa na composição desta cidade. A maioria das soluções construtivas existentes que constituem a casa burguesa não satisfazem as atuais exigências de isolamento sonoro, pois encontram-se degradadas ou desatualizadas.

Um melhor desempenho no isolamento sonoro pode ser obtido recorrendo a materiais sustentáveis. A escolha de materiais sustentáveis fundamenta-se no elevado peso que o setor da construção tem na economia e no ambiente, pelo que é fundamental apostar em soluções menos prejudiciais em termos ecológicos e que ajudem a enfrentar os desafios financeiros atuais.

No sentido de responder à problemática de reabilitação acústica de soluções construtivas da casa clássica do Porto burguês foram estudadas as vantagens da introdução de painéis compósitos de madeira e cimento e elaborou-se um catálogo com as soluções mais benéficas em termos acústicos. Através de ensaios laboratoriais analisa-se o comportamento a sons aéreos e de percussão de pavimentos, determina-se ainda a eficácia de um revestimento resiliente no isolamento a sons de percussão e compara-se os resultados com um modelo teórico. Aplicando o mesmo modelo teórico faz-se a caracterização da redução sonora das várias soluções de paredes interiores e coberturas.

Conclui-se que os painéis compósitos de madeira e cimento têm um grande potencial na reabilitação acústica. No isolamento a sons de condução aérea, a simples introdução de painéis compósitos é uma solução com benefícios satisfatórios, quando combinados com materiais absorventes, a lã de rocha, o benefício aumenta consideravelmente. No isolamento a sons de percussão, a grande potencialidade está na combinação com materiais resilientes, como se verá mais à frente.

PALAVRAS-CHAVES: Acústica, Reabilitação, Casa Burguesa, Porto, Sustentabilidade, Isolamento Sonoro, Painéis Compósitos de Madeira e Cimento.

ABSTRACT

Currently acoustics has a substantial weight on health and comfort. It is evident that the awareness to the extent of the negative effects due to noise are rising and these effects are increasingly easier to identify. As a result, the level of requirements from the user has had a progressive growth and the technological development of construction tends to meet the demand.

In a city like Oporto rehabilitation is essential to maintain the historical heritage that represent the social, cultural and economic evolution of the city. The classic Oporto's bourgeois house is one of the historical symbols observed in the city's composition. Most of the existing constructive solutions that constitute the bourgeois house does not meet the current sound insulation requirements, since they are degraded or out of date.

Better performance in sound insulation can be obtained using sustainable materials. The choice of sustainable materials is based on the big influence that construction industry has on the economy and nature. Therefore, it is essential to bet on less harmful solutions to the environment and solutions that meet with the current financial challenges.

In order to respond to acoustic rehabilitation problems of constructive solutions found on the Oporto's classical bourgeois house, it was studied the advantages of the introduction of cement-bonded wood composite panels and it was elaborated a catalog with the most beneficial solutions. Through laboratory tests it was analyzed air and impact sound transmission of several floor solutions, the effectiveness of a resilient floor cover in impact insulation and these results were compared with the results obtained using a theoretical model. The characterization of airborne noise reduction of interior walls and roofs solutions were made through the application of the same theoretical model.

The final conclusions were that the cement-bonded wood composite panels have a great potential in acoustic rehabilitation. The airborne sound reduction obtained with the introduction of cement-bonded wood composite panels in the existing solutions resulted in solutions with satisfactory benefits and, when combined with acoustic insulation materials the benefits increase considerably. In the impact sound reduction, a great potential was found in the combination of cement-bonded wood composite panels with resilient materials, as will be seen later.

KEYWORDS: Acoustic, Rehabilitation, Bourgeois House, Oporto, Sustainability, Sound Insulation, Cement-bonded Wood Composite Panels

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. NOTA INTRODUTÓRIA	1
1.1.1. A ACÚSTICA NA SAÚDE E CONFORTO	1
1.1.2. ÂMBITO DO TRABALHO	2
1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO	3
1.3. ESTRUTURA.....	4
2. SÍNTESE DO CONHECIMENTO	7
2.1. ENQUADRAMENTO TEMÁTICO.....	7
2.1.1. BREVE HISTÓRIA DA ACÚSTICA.....	7
2.1.2. CONCEITOS DE ACÚSTICA	7
2.1.3. MÉTODOS TEÓRICOS.....	9
2.1.4. MÉTODOS DE MEDIÇÃO	12
3. PAINÉIS COMPÓSITOS DE MADEIRA E CIMENTO	15
3.1. BREVE HISTÓRIA	15
3.2. VIROC	18
3.2.1. CERTIFICAÇÕES.....	19
3.2.2. AO NÍVEL DA ACÚSTICA.....	19
3.2.3. A EMPRESA.....	20
4. SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DA CASA CLÁSSICA DO PORTO BURGUEÊS	21
4.1. A CASA BURGUESA.....	21
4.2. TIPIFICAÇÃO DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DA CASA BURGUESA	22
4.2.1. PAREDES EXTERIORES	22
4.2.2. PAREDES INTERIORES.....	23

4.2.3. PAREDES DE MEAÇÃO	24
4.2.4. PAVIMENTOS	24
4.2.5. COBERTURA	25
4.2.6. REVESTIMENTOS E ACABAMENTOS.....	27
4.2.7. PORTAS	27
4.2.8. VÃOS ENVIDRAÇADOS	27
4.2.8. RESTANTES ELEMENTOS	27

5. METODOLOGIA DE TRANSMISSÃO SONORA

5.1. INTRODUÇÃO	29
5.2. ESCOLHA DO MÉTODO	29
5.3. MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO	30
5.3.1. MÉTODO BASEADO EM SHARP, CREMER E FAHY	30
5.3.2. MÉTODOS DESCRITOS NO LIVRO “ <i>NOISE ENGINEERING CONTROL</i> ” DE BIES & HANSEN	33
5.3.3. MÉTODO SEGUNDO A EN 12354-1	35
5.3.3.1. Modelo simplificado	35
5.3.3.2. Modelo detalhado	35
5.3.4. MÉTODO SEGUNDO A EN 12354-2	36
5.3.4.1. Modelo simplificado	36
5.3.4.2. Modelo detalhado	36

6. CARACTERIZAÇÃO DA TRANSMISSÃO SONORA POR ENSAIOS ACÚSTICOS

6.1. INTRODUÇÃO	39
6.2. PROCEDIMENTOS E CONDIÇÕES	39
6.3. PROCEDIMENTO E PLANO DE ENSAIOS.....	41
6.3.1. PLANO DE ENSAIOS	41
6.3.2. MATERIAIS.....	42
6.3.3. MONTAGEM E DESMONTAGEM.....	43
6.3.4. ENSAIOS	47
6.4. TRATAMENTO DE DADOS	48
6.4.1. ENSAIOS DE ISOLAMENTO A SONS DE CONDUÇÃO AÉREA	48
6.4.2. ENSAIOS DE ISOLAMENTO A SONS DE PERCUSSÃO	49

7. CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DAS SOLUÇÕES EXISTENTES	51
7.1. INTRODUÇÃO	51
7.2. PAVIMENTOS	52
7.3. PAREDES INTERIORES	58
7.4. COBERTURAS	60
7.4.1. COBERTURA INCLINADA	61
7.4.2. LAJE DE ESTEIRA	62
8. SOLUÇÕES REABILITADAS À BASE DE PAINÉIS COMPÓSITOS DE MADEIRA E CIMENTO	65
8.1. INTRODUÇÃO	65
8.2. PAVIMENTOS	65
8.2.1. SOLUÇÃO 1	66
8.2.2. SOLUÇÃO 2	69
8.2.3. SOLUÇÃO 3	72
8.2.4. SOLUÇÃO 4	75
8.2.5. SOLUÇÃO 5	78
8.2.6. SOLUÇÃO 6	81
8.2.7. SÍNTESE DE RESULTADOS E COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS OBTIDOS EM LABORATÓRIO E POR MODELO TEÓRICO	84
8.2.7.1. Pavimentos sem teto	84
8.2.7.2. Pavimentos com teto	86
8.3. PAREDES INTERIORES	87
8.3.1. SOLUÇÃO 1	89
8.3.2. SOLUÇÃO 2	90
8.3.3. SOLUÇÃO 3	91
8.3.4. SOLUÇÃO 4	93
8.3.5. SÍNTESE DE RESULTADOS	95
8.4. COBERTURAS	95
8.4.1. COBERTURAS INCLINADAS	95
8.4.1.1. Solução 1	96

8.4.1.2. Solução 2.....	97
8.4.2. LAJES DE ESTEIRA.....	98
8.4.2.1. Solução 1.....	98
8.4.2.2. Solução 2.....	99
8.4.3. SÍNTESE DE RESULTADOS.....	101

9. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS103

9.1. CONCLUSÕES.....103

9.1.1. CONCLUSÕES RELATIVAS ÀS SOLUÇÕES DE PAVIMENTOS104

9.1.1.1. Pavimentos sem teto104

9.1.1.2. Pavimentos com teto106

9.1.2. CONCLUSÕES RELATIVAS ÀS SOLUÇÕES DE PAREDES INTERIORES.....108

9.1.3. CONCLUSÕES RELATIVAS ÀS SOLUÇÕES DE COBERTURAS109

9.2. OUTRAS CONSIDERAÇÕES111

9.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS114

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. - Fluxograma do método científico utilizado neste trabalho.....	4
Fig. 2.1. - Sons aéreos e sons de percussão [1].....	8
Fig. 2.2. – Transmissões diretas e marginais [2]	8
Fig. 3.1. - Produtos fabricados à base de madeira (adaptado para português) [3]	15
Fig. 3.2. - Produtos derivados da madeira (adaptado para português) [3]	16
Fig. 3.3. - Composição painéis compósitos de partículas e cimento (adaptado para português) [4]	16
Fig. 3.4. - Variedade de cores, texturas e espessuras dos painéis Viroc [5].	18
Fig. 3.5. - Variedade de cores, texturas e espessuras dos painéis Viroc [5].....	18
Fig. 3.6. - Composição dos diferentes tipos de painéis Viroc (percentagem por quilograma) [6]	18
Fig.3.7. - Alteração do logótipo da Viroc [7]	20
Fig. 4.1. - Casa clássica do Porto burguês [8]	21
Fig. 4.2. – Parede exterior em pedra da casa do Porto burguês [8].....	23
Fig. 4.3. – Esquema de parede interior	23
Fig. 4.4. – Fotografia de parede de tabique simples (tabuado na vertical e fasquiado na horizontal) [9].....	24
Fig. 4.5. - Fotografia de habitação clássica do Porto burguês, pormenor da parede de meiação	24
Fig. 4.6. – Esquema Pavimento térreo da casa clássica do Porto burguês	25
Fig. 4.7. – Tipologia dos pavimentos [10]	25
Fig. 4.8. - Asna simples e asna complexa: 1 – asna simples; 2 – asna simples com nível; 3 - asna complexa -com pendural e escoras (adaptado de [11]).....	26
Fig. 4.9. – Fotografia de cobertura inclinada e teto (vistos do interior) [9].....	26
Fig. 4.10. – Fotografia de uma claraboia [8]	26
Fig. 5.1. - Diferença entre metodologia teórica e resultados experimentais de NRC a 132 paredes da referência [13] (--- limite dos 10% e 90%, — erro médio) [12]	31
Fig. 5.2 - Diferença entre metodologia teórica e resultados experimentais de NRC de 132 pavimentos da referência [14] (--- limite dos 10% e 90%, — erro médio) [12]	31
Fig. 5.3- Modelo de Sharp para paredes simples (gráfico da esquerda) e duplas (gráfico da direita) [15]	33
Fig. 6.1. – Esquema das posições da fonte sonora (retângulos) e da máquina de percussão (cruzes) na câmara emissora	47
Fig. 6.2. – Fotografia do sonómetro utilizado nos ensaios	47
Fig. 6.3. – Esquema das posições de medição na câmara recetora	48

Fig. 7.1. – Soluções construtivas a estudar na casa clássica do Porto burguês (adaptado de [8])	51
Fig. 7.2. – Pavimento existente sem teto e com teto	52
Fig. 7.3. – Pavimento existente sem teto em 3D	52
Fig. 7.4. – Pavimento existente com teto em 3D	53
Fig. 7.5. – Espetros da redução sonora do pavimento existente sem teto e com teto em bandas de 1/3 de oitava	54
Fig. 7.6. – Espetros da redução sonora do pavimento existente sem teto, sem tapete e com tapete em bandas de 1/3 de oitava	55
Fig. 7.7. – Espetros da redução sonora do pavimento existente com teto sem tapete e com tapete ...	56
Fig. 7.8. – Espetros da redução dos pavimentos sem teto e com teto resultantes dos ensaios em laboratório (“Solução sem teto” e “Solução com teto”) e da aplicação do modelo descrito em 5.3.1. (“Solução sem teto, por modelo teórico” e “Solução com teto, por modelo teórico”)	57
Fig. 7.9. – Esquema da parede interior (corte horizontal).....	58
Fig. 7.10. – Esquema de parede interior (corte transversal) e desenho 3D	58
Fig. 7.11. – Espectro da redução sonora da parede interior existente em bandas de 1/3 de oitava	59
Fig. 7.12. – Esquema de cobertura existente (corte transversal)	60
Fig. 7.13. – Esquema de cobertura inclinada (corte transversal)	61
Fig. 7.14. – Espectro da redução sonora da cobertura inclinada em bandas de 1/3 de oitava	62
Fig. 7.15. – Esquema da laje de esteira existente (corte transversal)	62
Fig. 7.16. – Espectro da redução sonora da laje de esteira existente em bandas de 1/3 de oitava	63
Fig. 8.1. – Esquema da solução 1 (corte transversal) e legenda.....	66
Fig. 8.2. – Espectro da redução sonora da solução 1 e da solução existente em bandas de 1/3 de oitava	67
Fig. 8.3. – Espetros dos níveis de pressão sonora da solução 1 e solução 1 com tapete em bandas de 1/3 de oitava	68
Fig. 8.4. – Espetros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 1 e solução 1 com tapete vs solução existente e solução existente com tapete	69
Fig. 8.5. – Esquema da solução 2 (corte transversal) e legenda.....	69
Fig. 8.6. – Espetros da redução sonora da solução 2 e solução existente em bandas de 1/3 de oitava	70
Fig. 8.7. – Espetros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 2 e solução 2 com tapete em bandas de 1/3 de oitava	71
Fig. 8.8. – Espetros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 2 e solução 2 com tapete vs solução existente e solução existente com tapete	72
Fig. 7.9. – Esquema da solução 3 (corte transversal) e legenda.....	72
Fig. 8.10. – Espetros da redução sonora da solução 3 e solução existente em bandas de 1/3 de oitava	73

Fig. 8.11. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 3 e solução 3 com tapete em bandas de 1/3 de oitava	74
Fig. 8.12. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 3 e solução 3 com tapete vs solução existente e solução existente com tapete	75
Fig. 8.13. –Esquema da solução 4 (corte transversal) e legenda.....	75
Fig. 8.14. – Espectros da redução sonora da solução 4 e solução existente com teto em bandas de 1/3 de oitava	76
Fig. 8.15. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 4 e solução 4 com tapete em bandas de 1/3 de oitava	77
Fig. 8.16. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 4 e solução 4 com tapete vs solução existente com teto e tapete	78
Fig. 8.17. – Esquema da solução 5 (corte transversal) e legenda.....	78
Fig. 8.18. – Espectros da redução sonora da solução 5 e solução existente com teto em bandas de 1/3 de oitava	79
Fig. 8.19. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 5 e solução 5 com tapete em bandas de 1/3 de oitava	80
Fig. 8.20. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 5 e solução 5 com tapete vs solução existente com teto e solução existente com teto e tapete	81
Fig. 8.21. –Esquema da solução 6 (corte transversal) e legenda.....	81
Fig. 8.22. – Espectros da redução sonora da solução 6 e solução existente com teto em bandas de 1/3 de oitava	82
Fig. 8.23. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 6 e solução 6 com tapete em bandas de 1/3 de oitava	83
Fig. 8.24. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 6 e solução 6 com tapete vs solução existente com teto e solução existente com teto e tapete	84
Fig. 8.25. – Gráficos de comparação entre espectros da redução sonora das soluções 1, 2 e 3 obtidos em laboratório e pelo modelo teórico, em bandas de 1/3 de oitava	85
Fig. 8.26. – Gráficos de comparação entre espectros dos níveis de pressão sonora de 4, 5 e 6 obtidos em laboratório sem e com o tapete, em bandas de 1/3 de oitava	86
Fig. 8.27. – Espectro da redução sonora do painel composto de madeira e cimento.....	88
Fig. 8.28. –Esquema da solução 1 de parede interior (corte horizontal) e modelo em 3D.....	89
Fig. 8.29. – Espectros da redução sonora da solução 1 e da solução existente de parede interior por bandas de 1/3 de oitava	89
Fig. 8.30. – Esquema da solução 2 de parede interior (corte horizontal) e modelo em 3D.....	90
Fig. 8.31. – Espectros da redução sonora da solução 2 e da solução existente de parede interior por bandas de 1/3 de oitava	91
Fig. 8.32. – Esquema da solução 3 de parede interior (corte horizontal) e modelo em 3D.....	91

Fig. 8.33. – Espectros da redução sonora da solução 3 e da solução existente de parede interior por bandas de 1/3 de oitava	92
Fig. 8.34. – Esquema da solução 4 de parede interior (corte horizontal) e modelo em 3D.....	93
Fig. 8.35. – Espectros da redução sonora da solução 4 e da solução existente de parede interior por bandas de 1/3 de oitava	93
Fig. 8.36. – Espectros da redução sonora da solução 4 e da solução 3 de parede interior por bandas de 1/3 de oitava	94
Fig. 8.37. – Esquema da solução 1 de cobertura inclinada (corte transversal) e legenda	96
Fig. 8.38. – Espectros da redução sonora da solução 1 e da solução existente de cobertura inclinada por bandas de 1/3 de oitava	96
Fig. 8.39. – Esquema da solução 2 de cobertura inclinada (corte transversal) e legenda	97
Fig. 8.40. – Espectros da redução sonora da solução 2 e da solução existente de cobertura inclinada por bandas de 1/3 de oitava	97
Fig. 8.41. – Esquema da solução 1 de laje de esteira (corte transversal) e legenda	98
Fig. 8.42. – Espectros da redução sonora da solução 1 e da solução existente de laje de esteira por bandas de 1/3 de oitava	99
Fig. 8.43. – Esquema da solução 2 de laje de esteira (corte transversal) e legenda	99
Fig. 8.44. – Espectros da redução sonora da solução 2 e da solução existente de laje de esteira	100
Fig.9.1. – Esquema da solução de pavimento existente sem teto.....	104
Fig.9.2. – Esquemas das três soluções de reabilitação de pavimentos sem teto (solução 1, 2 e 3) ..	104
Fig.9.3. – Espectros da redução sonora das soluções 1, 2 e 3 em bandas de 1/3 de oitava	105
Fig.9.4. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão das soluções 1, 2 e 3 sem e com tapete.....	105
Fig. 9.5. – Esquema da solução de pavimento existente com teto.....	106
Fig. 9.6. – Esquemas das três soluções de reabilitação de pavimentos com teto (solução 4, 5 e 6) .	106
Fig. 9.7. – Espectros da redução sonora das soluções 4, 5 e 6 em bandas de 1/3 oitava	107
Fig. 9.8. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão das soluções 4, 5 e 6 sem e com tapete.....	107
Fig. 9.9. – Esquema da solução de parede interior existente	108
Fig. 9.10. – Esquemas das quatro soluções de reabilitação de paredes interiores (soluções 1 e 2 em cima, e soluções 3 e 4 em baixo).....	108
Fig. 9.11. – Espectros da redução sonora das soluções 1, 2, 3, e 4 e da solução existente de parede interior em bandas de 1/3 oitava	109
Fig. 9.12. – Esquema da solução de cobertura inclinada existente.....	109
Fig. 9.13. – Esquemas das duas soluções de reabilitação de coberturas inclinada (solução 1 e solução 2)	110

Fig. 9.14. – Espectros da redução sonora da solução 1, 2 e da solução existente de coberturas inclinadas por bandas de 1/3 de oitava.....	110
Fig. 9.15. – Esquema da solução de laje de esteira existente.....	110
Fig. 9.16. – Esquemas das duas soluções de reabilitação de lajes de esteira (solução 1 e solução 2)	111
Fig. 9.17. – Espectros da redução sonora da solução 1, 2 e da solução existente de lajes de esteira por bandas de 1/3 de oitava	111
Fig. 9.18. – Espectros da redução sonora por bandas de oitava dos diferentes ensaios à solução E7	112
Fig. 9.19. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão por bandas de oitava dos diferentes ensaios à solução E7	113
Fig. 9.20. – Espectros da redução sonora por bandas de oitava dos diferentes ensaios às soluções E11, E14 e E15.....	114

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 6.1. – Plano de ensaios de determinação do isolamento sonoro s sons de condução aérea e de percussão	42
Tabela 6.2. – Características dos materiais	43
Tabela 6.3. – Características dos painéis Viroc	43
Tabela 6.4. – Características dos materiais em madeira	43
Tabela 7.1. - Valores da redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução sem teto	53
Tabela 7.2. – Valores da redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução com teto	53
Tabela 7.3. – Níveis de pressão sonora por bandas de oitava e $L_{n,w}$ da solução existente sem teto	55
Tabela 7.4. - Níveis de pressão sonora por bandas de oitava e $L_{n,w}$ da solução existente sem teto e com tapete sobre o soalho	55
Tabela 7.5. – Níveis de pressão sonora por bandas de oitava e $L_{n,w}$ da solução existente com teto	56
Tabela 7.6. – Níveis de pressão sonora por bandas de oitava e $L_{n,w}$ da solução existente com teto e com tapete sobre o soalho	56
Tabela 7.7. – Índices R_w e correções obtidos através do modelo teórico baseado em Sharp, Cremer e Fahy	57
Tabela 7.8. – Propriedades da madeira de pinho	58
Tabela 7.9. – Propriedades do revestimento em gesso	59
Tabela 7.10. - Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da parede interior existente	59
Tabela 7.11. – Propriedades da madeira de pinho	60
Tabela 7.12. – Propriedades do revestimento em gesso	60
Tabela 7.13. – Propriedades da telha Marselha	61
Tabela 7.14. – Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da cobertura inclinada existente	62
Tabela 7.15. - Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da laje de esteira existente	63
Tabela 8.1. – Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 1	67
Tabela 8.2. – Níveis de pressão sonora por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 1	68
Tabela 8.3. – Níveis de pressão sonora por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 1 com tapete	68
Tabela 8.4. – Redução sonora por bandas de oitava e R_w , c e C_{tr} da solução 2	70
Tabela 8.5. – Níveis de pressão por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 2	71
Tabela 8.6. – Níveis de pressão por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 2 com tapete	71
Tabela 8.7. – Redução sonora por bandas de oitava e R_w , c e C_{tr} da solução 3	73
Tabela 8.8. – Níveis de pressão por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 3	74
Tabela 8.9. – Níveis de pressão por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 3 com tapete	74
Tabela 8.10. – Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 4	76

Tabela 8.11. – Níveis de pressão por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 4.....	77
Tabela 8.12. – Níveis de pressão por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 4 com tapete.....	77
Tabela 8.13. – Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 5	79
Tabela 8.14. – Níveis de pressão por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 5.....	80
Tabela 8.15. – Níveis de pressão por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 5 com tapete.....	80
Tabela 8.16. – Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 6	82
Tabela 8.17. – Níveis de pressão por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 6.....	83
Tabela 8.18. – Níveis de pressão por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 6 com tapete.....	83
Tabela 8.19. – Tabela resumo dos índices de isolamento obtidos dos ensaios laboratoriais à solução existente sem teto e às soluções 1, 2 e 3	84
Tabela 8.20. – Valor dos índices R_w resultantes dos ensaios laboratoriais e por modelo teórico às soluções 1, 2 e 3, e a diferenças entre estes.....	85
Tabela 8.21. – Tabela resumo dos índices de isolamento obtidos dos ensaios laboratoriais à solução existente com teto e às soluções 4, 5 e 6	86
Tabela 8.22. – Valor dos índices R_w resultantes dos ensaios laboratoriais e por modelo teórico às soluções 4, 5 e 6, e a diferenças entre estes.....	87
Tabela 8.23. – Propriedades do painel compósito de madeira e cimento	87
Tabela 8.24. – Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} do painel compósito de madeira e cimento	88
Tabela 8.25. – Propriedades da lã de rocha	88
Tabela 8.26. – Propriedades do revestimento em gesso	88
Tabela 8.27. – Propriedades da madeira de pinho	88
Tabela 8.28. – Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 1	90
Tabela 8.29. – Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 2	90
Tabela 8.30. – Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 3	93
Tabela 8.31. – Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 4	94
Tabela 8.32. – Tabela resumo dos índices de redução sonora da solução existente e das soluções 1, 2, 3 e 4 de reabilitação acústica de paredes interiores.....	95
Tabela 8.33. – Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 1	96
Tabela 8.34. – Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 2	98
Tabela 8.35. – Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 1	99
Tabela 8.36. – Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 2	100
Tabela 8.37. – Tabela resumo dos índices de redução sonora da solução existente e das soluções 1 e 2 de reabilitação acústica de coberturas inclinadas.....	101
Tabela 8.38. – Tabela resumo dos índices de redução sonora da solução existente e das soluções 1 e 2 de reabilitação acústica de lajes de esteira	101

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A – Absorção sonora equivalente [m^2]

a_i ou a_j – Comprimento de absorção equivalente do elemento i ou j [m]

c – Celeridade [m/s]

C, C_1 ou C_{tr} – Termo de adaptação [dB]

D – Isolamento sonoro bruto [dB]

dB - decibel

$D_{2m,nT,w}$ – Isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado [dB]

$D_{nT,w}$ – Isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado [dB]

$D_{v,ij}$ – Diferença dos níveis médios de velocidades de vibração estabelecidos nos elemento i e j, quando o elemento i é excitado

K_{ij} – Índice de redução de vibração para cada caminho de transmissão marginal ij

E – Energia [J]

f – Frequência [Hz]

f_0 - frequência de ressonância do sistema [Hz]

f_c – Frequência crítica [Hz]

f_{ref} – frequência de referência; $f_{ref}=1000$ Hz

GPa – gigapascal

Hz – hertz

l_{ij} – Comprimento da ligação entre o elemento i e j [m]

L_n – Nível de pressão sonora a sons de percussão para cada banda de frequência [dB]

$L_{n,situ}$ – Nível de pressão sonora a sons de percussão normalizado para a situação de *in situ* [dB]

$L'_{n,w}$ - Índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão, medido *in situ* [dB]

$L_{n,w}$ – Índice de isolamento sonoro normalizado a ruídos de percussão [dB]

$L_{n,w,eq}$ – Índice de isolamento sonoro normalizado equivalente, a ruídos de percussão [dB]

$L_{nT,w}$ – Índice de isolamento sonoro padronizado a ruídos de percussão [dB]

ΔL – Eficácia de um revestimento [dB]

m – Massa do elemento [kg]

P – Potência [W]

p – Pressão sonora [Pa]

p_0 – Pressão sonora de referência [Pa]

R – Redução sonora, valor em cada banda de frequência [dB]

R_{situ} – Índice de redução sonora normalizada para a situação de *in situ* [dB]

R_w – Índice de redução sonora para ruídos aéreos, medido em laboratório [dB]

R'_w – Índice de redução sonora para ruídos aéreos, medido *in situ* [dB]

s- Tempo em segundos [s]

S – Superfície real do material [m²]

S_s – Área do elemento de separação [m²]

t – Tempo [s]

T – Tempo de reverberação [s]

T_0 – Tempo de reverberação de referência [s]

V – Volume do compartimento [m³]

α – Coeficiente de absorção sonora

θ_L – Ângulo limite ou crítico [°C]

σ – Coeficiente de transmissão sonora, fator de radiação

ρ – Densidade do material [kg/m³]

η - Fator de perdas

ω – Frequência angular [rad.s⁻¹]

1

INTRODUÇÃO

1.1. NOTA INTRODUTÓRIA

1.1.1. A ACÚSTICA NA SAÚDE E CONFORTO

Acústica é o termo traduzido do latim “*acoustics*”, criado por Sir Francis Bacon, e refere a parte da Física que estuda e analisa o som.

Nos seus primórdios, esta ciência estava mais relacionada com a música, instrumentos e salas de espetáculos. Nestes locais é procurada a boa percepção da palavra ou uma “boa” audição dos instrumentos. Com o passar dos anos tornou-se cada vez mais necessário aplicar o estudo da acústica aos edifícios de habitação. Desde o cavalgar dos cavalos, ruído das pessoas e da envolvente até, nos dias de hoje, ao ruído das máquinas, tudo pode causar incómodo no quotidiano da população e provocar desconforto. O conforto abrange várias áreas e a acústica está inserida.

As exigências por parte do utilizador têm aumentado e as tecnologias construtivas acompanham este crescimento. A não perturbação por parte de espaços exteriores ou espaços interiores contíguos, e até mesmo o silêncio, é algo atualmente bastante procurado. Nos últimos anos vários são os estudos que comprovam que o ruído é causa de má qualidade de vida e de más condições de saúde, o que pode justificar a crescente procura e preocupação pela acústica dos edifícios.

Um estudo feito pela DG Environment, em 2014, intitulado “*Health implication of road, railway and aircraft noise in the European Union*” [1] concluiu que a exposição ao ruído na Europa contribui, entre outros, para:

- cerca de 910 mil casos adicionais predominantes de hipertensão;
- 43 mil entradas em hospitais por ano;
- pelo menos 10 mil mortes prematuras por ano relacionadas doença cardíaca coronária e acidente vascular cerebral;
- 19,8 milhões de adultos na Europa sentem desconforto causado pelo ruído de tráfego rodoviário, aéreo, industrial e ferroviário;
- estima-se que 7,9 milhões de adultos têm distúrbios durante o sono devido a ruído noturno.

Uma publicação da União Europeia [2] relata ainda que cerca de 40% da população residente na UE está exposta ao ruído rodoviário com valores que excedem os 55dB(A), 20% está exposta a níveis que excedem 65dB(A) durante o dia e 30% está exposta a níveis superiores a 55dB(A) à noite. Enquanto que os valores limites de exposição (máximos) para zonas habitacionais, zonas sensíveis, em Portugal são: 65dB(A) para o período diurno-entardecer-noturno e 55dB(A) para o período noturno.

Confirma-se que a acústica é um fator integrante no conforto e decisivo para a saúde, há uma necessidade crescente de melhores condições de vida, pelo que é fundamental que as soluções construtivas adotadas apresentem um bom desempenho nas propriedades relacionadas com o som.

1.1.2. ÂMBITO DO TRABALHO

A casa clássica do Porto burguês, âmbito deste trabalho, é uma habitação antiga localizada no Porto, cidade situada na margem do rio Douro e segunda maior cidade de Portugal. Estas edificações eram construídas recorrendo a técnicas de construção antigas, algumas já em desuso, e materiais de construção tradicionais: cal, madeira, pedra, argila, areia, metais, próprios da antiga classe burguesa, contrariamente às habitações mais recentes que fazem uso, por exemplo, do betão armado e pré-fabricados.

O contacto direto com o mar fez com que a cidade do Porto sofresse um grande desenvolvimento e crescesse ao nível comercial, de serviços e da indústria. Com a revolução industrial e expansão das oficinas e fábricas gerou-se emprego, o que levou à atração das pessoas do meio rural para a cidade, principalmente à volta das grandes áreas industriais. A necessidade de habitação pela classe operária veio trazer as tradicionais ilhas – pequenas habitações, contruídas em fila e nas traseiras das habitações da classe média. A classe mais forte e de maior importância nesta época foi a burguesia – classe média, onde surgem as habitações características deste período: habitações em banda, com rés-do-chão em pedra e restantes pisos em tabique, andares salientes, de tipologia polifuncional. [3]

A casa burguesa é “(...) a casa estreita e alta, que, na sua forma e sentido originários, além de derivar das construções próprias dos burgos amuralhados ou, de um modo geral, dos locais onde se verifica a necessidade ou a conveniência do adensamento da população em áreas limitadas, constitui um tipo híbrido funcional de residência urbana e estabelecimento comercial ao mesmo tempo, referidas à mesma família, estritamente utilitário, de acordo com as necessidades profissionais e a mentalidade da gente que lhe é própria.” [4]

Segundo o documento “*O Parque Habitacional e a sua Reabilitação. Análise e Evolução*”, produto da colaboração entre o INE e o LNEC, referente a períodos de 2001 até 2011, as regiões de Grande Porto, Lisboa e Alentejo são as que apresentam índices de envelhecimento, relacionados com a data de construção das habitações, mais elevados. Contudo a região de Alentejo apresenta um parque habitacional envelhecido, mas bem conservado. As regiões de Grande Porto e Lisboa são então as situações mais gravosas no panorama nacional e, segundo este mesmo documento, são as áreas com mais necessidade de reabilitação habitacional. [5]

A cidade do Porto apresenta um parque habitacional envelhecido, a habitação portuense burguesa, e as exigências atuais de isolamento e comportamento acústico dos elementos e sistemas construtivos não são satisfeitas por estas construções, pois se encontram desatualizadas ou degradadas.

Desta forma, com o intuito de analisar e encontrar soluções para responder à problemática de reabilitação acústica destes edifícios clássicos, surge este trabalho.

1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO

As edificações portuenses em estudo são antigas e com grande valor histórico pois constituem património representativo de várias épocas, expressão da evolução social, cultural e económica da cidade do Porto. Assim sendo, para a preservação deste valor histórico é dada como premissa apenas soluções que visam a reabilitação com o aproveitamento de materiais e soluções construtivas já existentes.

O fator sustentabilidade nas suas vertentes económicas e ecológicas é indispensável para os dias de hoje, para a continuação da existência da indústria da construção e a sua ligação com a natureza, para as condições económicas atuais e para conservação da biodiversidade, e como tal a população em geral está bastante consciencializada para este facto. A sustentabilidade pode ser obtida pela utilização de materiais renováveis ou pela utilização de materiais reciclados e os painéis compósitos à base de madeira e cimento são um caso de materiais de construção que reutiliza resíduos de madeira. Portanto, no sentido de responder à problemática da reabilitação acústica de soluções construtivas das edificações do Porto burguês com soluções sustentáveis utilizou-se painéis compósitos de madeira e cimento.

Aplicando metodologias teóricas de previsão pretende-se caracterizar o isolamento sonoro das soluções típicas de pavimentos, paredes interiores e coberturas do Porto burguês e soluções reabilitadas pela integração de painéis compósitos de madeira e cimento, preservando os materiais e soluções pré-existentes. Pretende-se, posteriormente, através de ensaios laboratoriais determinar-se o isolamento a sons de condução aérea e de percussão das várias soluções de pavimentos acusticamente reabilitadas, enriquecendo a caracterização acústica destas soluções construtivas à base de painéis compósitos de madeira e cimento e das soluções existentes.

A identificação das soluções construtivas das casas antigas do Porto burguês e a investigação e desenvolvimento de soluções à base de painéis compósitos de madeira e cimento com melhor desempenho ao nível acústico é acompanhada da respetiva análise e tratamento de resultados, comparação entre soluções e distinção da potencialidade acústica da inserção dos painéis compósitos de madeira e cimento e a sua combinação com outros materiais utilizados no isolamento acústico.

Para a atividade de investigação adotou-se um método de científico. Entre outras, as metodologias que mais se destacam e que se adequam ao carácter científico e teórico-prático deste trabalho são três. O método dedutivo, baseado em testar e confirmar uma hipótese, bastante limitado por natureza. O método indutivo, mais natural e aberto à exploração, uma vez que assenta na criação de uma teoria para uma determinada observação, busca da fundamentação pelo pensamento. E por fim e o mais adequado, o método científico que consiste num processo de experimentação para a exploração de observações e formular respostas. É um método muito usado pelos cientistas, como o próprio nome indica, que se resume em obter resultados, através de um processo de experimentação e análise, na tentativa de se solucionar uma dada questão. [6]

A fundamentação pela experiência e justificação pelos resultados obtidos é, na perspetiva do autor, o método mais ajustado de aceitação ou rejeição de uma hipótese e por isso a metodologia escolhida.

Dada uma solução construtiva, se após a inserção do painel compósito à base de madeira cimento os resultados experimentais ou resultados provenientes da modelação teórica forem satisfatórios retiram-se as conclusões e introduz-se no catálogo. Caso contrário, procede-se a uma nova hipótese de solução de sistema construtivo, se possível.



Fig. 1.1. - Fluxograma do método científico utilizado neste trabalho

1.3. ESTRUTURA

A presente dissertação inicia-se realçando a importância da acústica na saúde e conforto, a necessidade de reabilitação dos edifícios antigos da cidade do Porto, reabilitação acústica, e a sustentabilidade da introdução de painéis compósito à base de madeira cimento na construção. Seguidamente é feita uma investigação do estado de conhecimento, através de uma revisão bibliográfica, em torno da problemática a fim de saber qual o estado de conhecimento, a potencialidade reconhecida aos painéis compósitos à base de madeira, trabalhos realizados, artigos científicos e livros a qual se possa ter acesso. Nos capítulos posteriores, adotando uma metodologia científica de investigação, após descrição do painel compósito de madeira e cimento e do levantamento das soluções construtivas do Porto burguês, desenvolvem-se soluções construtivas à base destes painéis que procuram responder à ineficiência ou inexistência de propriedades acústicas de isolamento das soluções iniciais – paredes interiores, pavimentos e coberturas. No fim, são apresentadas as considerações finais relacionadas com o trabalho, conclusões e propostas de desenvolvimentos futuros.

Este trabalho encontra-se dividido em nove capítulos.

O presente capítulo é a introdução onde são apresentados os motivos que levaram à escolha deste tema e a sua importância, os objetivos, âmbito, o método de investigação e a respetiva estruturação da dissertação.

No segundo capítulo é abordada uma síntese do conhecimento, breve história e conceitos de acústica, referência a trabalhos, artigos científicos e livros relacionados com a temática.

No terceiro capítulo é apresentada uma investigação desde os painéis à base de madeira até aos painéis compósitos à base de madeira e cimento, a sua história, aplicação e tecnologia de fabrico. É feita uma apresentação de uma empresa portuguesa produtora destes painéis, denominados painéis Viroc, a Viroc Portugal. Neste capítulo são também analisados resultados e conclusões de trabalhos, certificações associadas aos painéis Viroc e dados de outras empresas relacionadas com painéis compósitos de madeira e cimento.

O quarto capítulo consiste na caracterização das soluções construtivas do Porto burguês, com mais detalhe nas soluções a trabalhar nos capítulos seguintes: paredes interiores, pavimentos e coberturas.

No quinto capítulo é feita uma descrição e análise dos métodos teóricos referenciados nos capítulos posteriores, métodos que calculam o isolamento sonoro a sons de condução aérea e métodos normalizados para cálculo de índices relacionados com o isolamento sonoro.

No sexto capítulo é descrito o procedimento e condições de ensaio em laboratório para caracterização do isolamento sonoro a sons de condução aérea e de percussão presentes nas normas em vigor. É exposto o plano de ensaios, procedimentos utilizados e processo de tratamento de dados e obtenção de resultados.

No sétimo capítulo, recorrendo à metodologia de previsão escolhida e a ensaios laboratoriais, são caracterizadas acusticamente as soluções existentes, soluções construtivas típicas da casa clássica do Porto burguês.

No oitavo capítulo, recorrendo igualmente à metodologia de previsão escolhida e a ensaios laboratoriais, são apresentadas as soluções de reabilitação acústica de pavimentos, paredes interiores e coberturas, soluções à base de painéis compósitos de madeira e cimento.

No capítulo nove é feita uma análise dos resultados, comparação das soluções que foi feita no capítulo 7 e 8, algumas considerações relativas a diferenças de procedimentos de ensaios e propostas de desenvolvimentos futuros.

No fim encontram-se as referências bibliográficas, relativas às referências feitas no texto, as referências de figuras, relativas às referências feitas nas legendas das figuras, e anexos.

2

SÍNTESE DO CONHECIMENTO

2.1. ENQUADRAMENTO TEMÁTICO

2.1.1. BREVE HISTÓRIA DA ACÚSTICA

A evolução histórica da acústica acompanha outras áreas igualmente aplicadas na construção e desenho de edifícios. Um dos mais célebres antigos engenheiros acústicos é Marcus Vitruvius Pollio, um engenheiro romano, bastante conhecido pela obra “*De architectura*” onde retrata a arquitetura e a construção de teatros. Vitruvius aborda vários aspetos a ter em consideração: as reflexões, o eco, a ressonância, os materiais a utilizar e suas características de absorção, os ressoadores, alturas recomendadas, tudo descrito sem explicação física e que atualmente também são abordados e fazem todo o sentido. [7]

Nas eras medieval e renascentista Vitruvius e suas obras eram já vastamente conhecidas. A música juntamente com a expansão da religião ajudou a um progresso da acústica das catedrais e igrejas. A acústica destes lugares favorecia os instrumentos da época com longos tempos de reverberação, porém a inteligibilidade da palavra era um desastre, acrescentando o constante sussurrar das pessoas.[7]

Mais tarde, a procura da física do som ocupou a maioria dos trabalhos nas duas primeiras centenas de anos do século XIX. Wallace Clement Sabine (1868-1919), intitulado de “Pai da Acústica Arquitetónica”, foi um dos pioneiros na acústica de interiores cujo primeiro trabalho foi procurar formas de melhorar a fraca acústica de um teatro para aulas da Universidade de Harvard, onde resultou a equação de cálculo do tempo de reverberação, conhecida como fórmula de Sabine. [7]

Desde Vitruvius até aos dias de hoje a acústica, a construção, a arquitetura, a engenharia, a física e a matemática têm progredido, fruto do trabalho destes cientistas, onde resultam as equações, as leis, os modelos, as normas e a legislação existente.

2.1.2. CONCEITOS DE ACÚSTICA

Pressupondo que o leitor conhece os conceitos básicos de acústica, na acústica de edifícios há dois cenários a ter em consideração que visam a correção de compartimentos para o som aí emitido – correção acústica - ou de isolar para o som que entra/sai para/de compartimentos contíguos – isolamento sonoro. Estes sons podem ter origem aérea, por vibração do ar, ou na solicitação mecânica direta na fonte sobre os elementos construtivos, ou simplesmente, por percussão. [8]

A correção acústica está associada à capacidade de absorção dos materiais e geometria do espaço. É usual utilizar-se materiais e sistemas absorventes sonoros cujas características permitem a dissipação de energia sonora por fenómenos de vibração e ressonância. [8]

O isolamento sonoro está relacionado com as características dos materiais e comportamento dos elementos. Distingue-se em isolamento a ruídos de condução aérea e ruídos de percussão. O desconforto causado por ruídos de percussão é maior que o aéreo uma vez que após a energia é transmitida a um determinado elemento construtivo esta se divide e se propaga rapidamente para os elementos a ele ligados. Os ruídos de condução aérea fazem-se sentir maioritariamente nos compartimentos contíguos. [8]

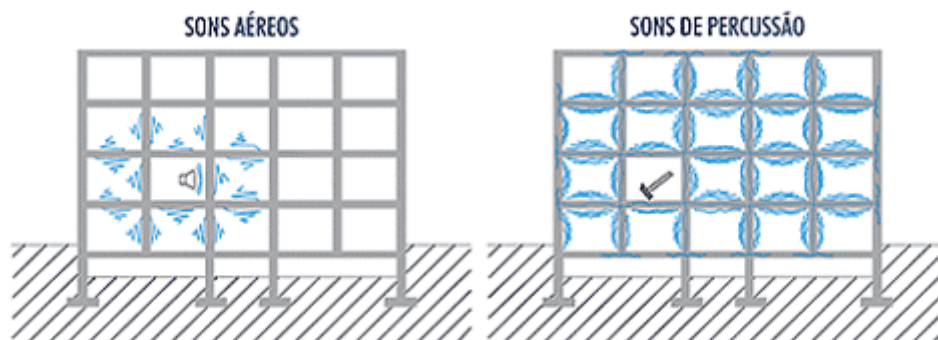


Fig. 2.1. - Sons aéreos e sons de percussão. [1]

O ruído transmite-se tanto diretamente através de um elemento de separação, denominadas transmissões diretas, como através dos elementos que contornam o elemento de separação, as transmissões marginais. Além destas, existem ainda as transmissões parasitas que estão relacionadas com a degradação do isolamento sonoro, que ocorrem em pontos fracos. [8]

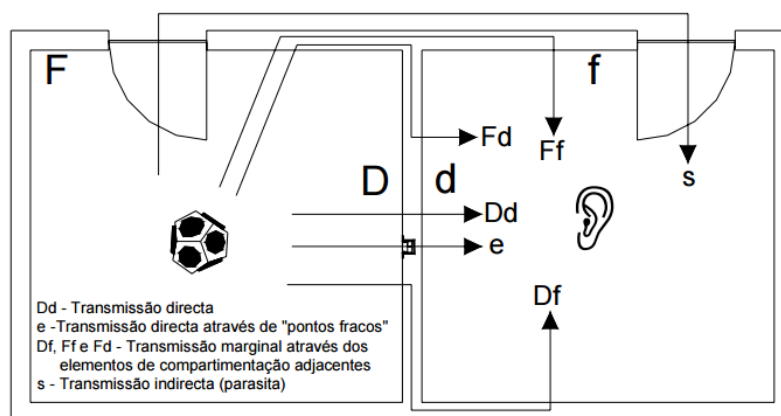


Fig. 2.2. – Transmissões diretas e marginais. [2]

A caracterização da transmissão sonora engloba os métodos de medição do isolamento sonoro, onde existem de um modo geral diferentes vias de o realizar: ensaios laboratoriais e experiências *in situ*, métodos de previsão teóricos e métodos de medição.

Os resultados de ensaios realizados em laboratório a um dado elemento apenas correspondem às transmissões diretas, onde resulta o R_w e $L_{n,w}$. R_w – índice de redução sonora para ruídos aéreos- que se obtém a partir dos valores R_i (para cada banda de frequência i) e $L_{n,w}$ – índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão - obtido pelos valores de L_i (valor de pressão sonora média para cada banda de frequência i), ajustados pelas curvas de referência normalizadas da NP ISO 717-1 e NP ISO 717-2, respetivamente para o cálculo de R_w e de $L_{n,w}$.

Se medido *in situ*, o índice $D_{n,w}$ corresponde ao isolamento sonoro “padronizado” para ruídos aéreos, $D_{2m,nT,w}$ é índice de isolamento sonoro “padronizado” a ruídos aéreos para elementos em contacto com o exterior e $L'_{nt,w}$ corresponde ao índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão, todos ajustados pelas mesmas curvas de referência da NP ISO 717-1 e NP ISO 717-2, respetivamente para o cálculo de R_w e de $L_{n,w}$.

A divergência que existe entre os índices e resultados obtidos em laboratório e *in situ* deve-se ao facto de em laboratório não se contabilizar o efeito das transmissões marginais, uma vez que em laboratório elas não existem. Caso que não acontece nas experiências *in situ* visto que não é possível excluir a presença destas transmissões. [8]

Os ensaios laboratoriais normalizados para ruídos aéreos estão descritos na EN ISO 10140-2 e para ruídos de percussão estão descritos na EN ISO 10140-3.[8]

Os modelos teóricos baseiam-se no comportamento físico dos materiais. Através de características como a massa, frequências crítica e de ressonância, fator de perdas, módulo de elasticidade e de rigidez, campo sonoro incidente e outros é possível descrever um modelo teórico que se pretende simular o comportamento real. [8]

2.1.3. MÉTODOS TEÓRICOS

Os métodos teóricos, que têm como intuito a caracterização da transmissão sonora, mais utilizados atualmente são os seguintes:

- transmissão aérea:
 - método elasto-dinâmico
 - modelo inercial
 - método de E. Gerretsen
 - método de Meisser
 - método de análise modal
 - método dos elementos finitos (FEM)
 - método dos elementos de contorno (BEM)
 - método de análise estatística de energia (SEA)
- transmissão por percussão:
 - método de E. Gerretsen
 - método de análise modal
 - método dos elementos finitos (FEM)
 - método dos elementos de contorno (BEM)
 - método de análise estatística de energia (SEA)
 - método de R. Josse
 - método do invariante $I_a + I_p$

Método elasto-dinâmico

Método baseado na Lei da Massa cujo índice de isolamento depende do ângulo de incidência (θ) e da frequência angular de vibração (w):

$$R = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{\tau(\theta, \omega)} \right) = 10 \cdot \log \left[1 + \left(\frac{m' \cdot \omega \cdot \cos \theta}{2 \cdot \rho_0 \cdot C_0} \right)^2 \right] \text{ (dB)} \quad (2.1)$$

Apresenta bons resultados para situações onde as frequências se encontram longe da frequência de coincidência e acima da frequência de ressonância. Por outro lado, não contabiliza o efeito das frequências de ressonância e de coincidência, o que leva à utilização de correções. [9]

Modelo Inercial

Modelo traduzido pela curva que relaciona a massa superficial do elemento de compartimentação com o índice de redução sonora respetivo. Não contempla o efeito devido à rigidez, amortecimento interno dos elementos de compartimentação e a existência de heterogeneidades significativas, embora se obtenha resultados razoáveis. [10]

Método de E. Gerretsen

O método de E. Gerretsen surgiu como modelo de estudo de propagação de sons aéreos através de elementos estruturais e de compartimentação de edifícios e, posteriormente, foi desenvolvido com o intuito de aplicar no estudo da propagação sonora de ações de choque.

Este método é eficiente e mais fiel ao comportamento dos elementos de compartimentação na medida em que considera o efeito das transmissões marginais. É distinguido em duas metodologias, uma para a transmissão aérea e outra por percussão, e apresenta como dificuldades a obtenção de parâmetros (fatores de radiação e de transmissão pelos vários caminhos de propagação de energia sonora considerados- sons aéreos; valor associado à mobilidade do elemento – sons de percussão) de difícil quantificação prática. [10]

Método Meisser

Este método criado por Mathias Meisser em 1973 tem como objetivo a obtenção aproximada dos valores de R com a frequência para paredes duplas. [8]

Após a determinação da redução sonora para a frequência de 500 Hz pela equação seguinte, é calculada a frequência de ressonância massa-ar-massa, e as frequências críticas de cada painel, e são traçados segmentos de reta com diferentes declives, especificados com mais detalhe em Carvalho (2016).

$$R_{500 \text{ Hz}} = 13,3 \cdot \log(m1 + m2) + K + 13,4 \text{ [dB]} \quad (2.2)$$

K= 4dB, caixa de ar com dimensões correntes (4 a 5 cm) e preenchida com material absorvente e painéis de massas da mesma ordem de grandeza

K= 9dB, (valor máximo) para espessuras de caixa de ar superiores de 10 cm

Método de análise modal

Análise modal é o processo de determinar as características dinâmicas inerentes a um sistema, por meio da vibração e através de frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibração. Com estes dados é formulado um modelo matemático correspondente ao comportamento dinâmico do sistema. [11]

Baseado numa resposta à vibração invariante e linear no tempo, permite caracterizar acusticamente elementos de compartimentação. [10]

As dificuldades associadas a este processo existem para bandas de elevadas frequências e para elevados amortecimentos internos dos elementos de compartimentação. [12]

Derivada da análise modal teórica e do modelo modal, surgiu a análise modal prática (*modal testing*). Esta envolve medição de respostas ao impulso por parte do sistema, enquanto que a análise modal assenta na correlação entre a resposta vibratória numa localização e a excitação na mesma ou noutra localização como uma função de frequência de excitação. [11]

Método dos elementos finitos (FEM)

Método dos elementos finitos (em inglês: *Finite Element Method*, FEM) foi desenvolvido nos anos 50 com o objetivo de analisar sistemas estruturais de aviões, este método consiste na subdivisão do domínio em estudo em várias pequenas sub-regiões, os elementos finitos, que podem tornar formas simples. É um modelo numérico que pode ser aplicado a qualquer sistema físico por meio de equações diferenciais parciais e que, segundo Patricio (1995), se revela ser “*bastante potente quando implementado em sistemas de cálculo automático*” e “*para a caracterização da propagação sonora devida a sons de percussão e/ou a sons aéreos através de elementos de compartimentação*” que permite obter resultados de confiança e sensíveis a pequenas alterações de parâmetros de entrada e que considera a existência de heterogeneidades significativas [13]. Contudo existem dificuldades de refinamento nas altas frequências e na necessidade de compatibilidade que é preciso assegurar entre os vários tipos de elementos finitos que se utilizam. [14]

Método dos elementos de fronteira (BEM)

Este método (em inglês *Boundary Element Method*, BEM) é um método numérico similar ao método dos elementos finitos bastante relacionado com o eletromagnetismo. Na acústica é como método de cálculo do isolamento sonoro e apresenta as suas vantagens no estudo a frequências baixas de uma parede com propriedades elásticas que separa dois espaços contíguos, uma vez que é capaz de efetuar uma modelação e análise que satisfaz as condições de campo distante e apenas descreve o que é essencial nestes casos, as fronteiras dos elementos em estudo. Ao contrário do método dos elementos finitos, este método apenas tem em consideração os elementos segundo duas dimensões e permite resolver problemas não lineares. [15]

Método de análise estatística de energia (SEA)

Este método (em inglês *Statistics Energy Analysis*, SEA) fundamenta-se na análise do balanço energético entre vários subsistemas, com constante estado de vibração. Cada subsistema é considerado um reservatório de energia. As equações matemáticas usadas consideram a energia que flui entre cada par de subsistemas e a perda de energia pelo amortecimento.

$$P_{ij} = 2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot \eta_{ij} \cdot N_i \cdot \left[\frac{E_i}{N_i} - \frac{E_j}{N_j} \right] \quad (2.3)$$

η : fator de perda devido ao acoplamento

N : largura do “reservatório”

A energia dissipada é proporcional à energia dinâmica absoluta do subsistema (E):

$$P_{diss} = 2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot E \cdot \eta \quad (2.4)$$

Este método permite obter resultados aceitáveis, mas pouco fidedignos para as bandas de baixas frequências devido à existência de poucos modos de vibração. [16]

Método de R. Josse

O método de R. Josse destina-se especificamente à caracterização da propagação de sons de percussão e apresenta duas vertentes: 1) caso de uma força contínua alternada e sinusoidal, 2) caso de uma força pontual e impulsiva. [10]

É um modelo analítico que se aproxima do comportamento real dos elementos de compartimentação de edifícios, porém, segundo Patricio (1995) “*não dá resultados de confiança para frequências inferiores à frequência crítica do elemento de compartimentação dado que o fator de radiação do paramento, a que o método recorre, não é, no caso, um valor facilmente quantificável. À semelhança das metodologias anteriores não contempla a existência de heterogeneidades significativas.*” [10]

Método do invariante $I_a + I_p$

Este é mais um método específico para sons de percussão. Trata-se de um método operacional que não permite a descrição do isolamento sonoro ou da propagação sonora, mas faz uso de valores de determinados elementos-tipo. A um determinado elemento-tipo corresponde um valor constante do invariante $I_a + I_p$ (ou $R_w + L_{n,w}$).

Como era de esperar, não é um método que permita tratar objetivamente o problema em causa, acrescido do número limitado de tipificações possíveis. [10]

Alguns destes métodos de caracterização e previsão sonora serão descritos com mais detalhe no capítulo 5 e vão ser utilizados na caracterização e previsão sonora das soluções construtivas típicas do Porto burguês e das soluções acusticamente reabilitadas à base de painéis compósitos de madeira e cimento, nos capítulos 7 e 8, respetivamente.

2.1.4. MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Na caracterização da transmissão sonora, além dos ensaios em laboratórios, experiências *in situ* e modelação teórica existem ainda os métodos de medição. Com recurso a equipamentos próprios ou métodos normalizados distinguem-se os seguintes métodos:

- método da holografia acústica: holografia acústica assenta na caracterização da transmissão de sons aéreos e de percussão com recurso à recolha de dados bidimensionais, o holograma, usados para reconstruir o campo de pressão sonora tridimensionalmente, por meio de vários pontos de medição [10]. Uma das vertentes de análise é a holografia acústica de campo próximo (*Nearfield Acoustic Holography* – NAH), um método de medição experimental [17] com aplicabilidade não só no campo sonoro como

no campo de velocidades das partículas e intensidade acústica. A grande utilidade encontra-se no elevado volume de informação que é possível obter nas medições, contudo, segundo Nilton G. Colinas (1999) as limitações do número de pontos de medição e a presença de componentes de ondas dispersantes no campo próximo geram problema de fugas no processamento dos sinais medidos, o qual introduz grandes erros sistemáticos nos resultados, minimizados usando técnicas de filtração do sinal.

- método da intensimetria sonora: mais específico para a caracterização da transmissão de sons aéreos (mas podendo também ser aplicado na transmissão de sons de percussão) permite obter informação de uma forma similar à holografia acústica. São feitas séries de medições a sub-regiões do elemento em estudo, podendo também obter-se a direção do fluxo de energia sonora, que entram em equações de cálculo de redução de intensidade sonora. Segundo Patricio (1995) não é um método fiável quando o espaço de receção apresenta características de muito reverberante. [10]

- método ISO/CEN: método experimental, normalizado, que pode ser aplicado tanto em obra como em laboratório, e cuja caracterização do comportamento pode ser feita através de um valor único, o índice. Atualmente é referido na norma EN 12354 – “*Building acoustics - “Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements”*”. Esta norma está dividida em 6 partes [18]:

- Parte 1: Isolamento sonoro a sons aéreos entre compartimentos;
- Parte 2: Isolamento sonoro a sons de percussão entre compartimentos;
- Parte 3: Isolamento sonoro a sons aéreos vindos do exterior;
- Parte 4: Transmissão de sons interiores para o exterior;
- Parte 5: Níveis sonoros de equipamentos de serviço;
- Parte 6: Absorção sonora em espaços fechados.

Esta norma tem como referências normas de medição e avaliação sonora, como por exemplo, a EN ISO 717 e EN ISO 140.

Nas partes 1 e 2 os métodos de cálculo são divididos em método simplificado e detalhado.

No método detalhado, o coeficiente de transmissão global pode ser então obtido pela soma de vários coeficientes de transmissão parciais, correspondentes fundamentalmente a três tipos de transmissão sonora: transmissão direta através do elemento de separação, transmissão indireta através de um dos elementos da envolvente e transmissão direta e indireta devido à presença de outras vias de propagação no elemento de separação ou num elemento da envolvente (aberturas, sistemas de ventilação, ou pelo exterior, através de portas e janelas), respetivamente. Já o método simplificado apenas contabiliza a transmissão que se propaga através dos próprios elementos, isto é, no meio sólido. [9]

Segundo Patricio (1995) apresenta como aspeto desfavorável a dificuldade de caracterização do comportamento heterogéneo de pontos ou zonas dos elementos de compartimentação. [10]

3

PAINÉIS COMPÓSITOS DE MADEIRA E CIMENTO

3.1. BREVE HISTÓRIA

Os painéis à base de madeira mais conhecidos são os painéis de aglomerado de partículas de madeira unidas (*particleboard*), por exemplo, com resinas, contraplacado (*plywood*), painéis à base de fibras de madeira unidas (*fibreboard*), por exemplo, com resinas e os painéis de aglomerado de partículas de madeira coladas e orientadas perpendicularmente (*oriented strand board - OSB*).[19]

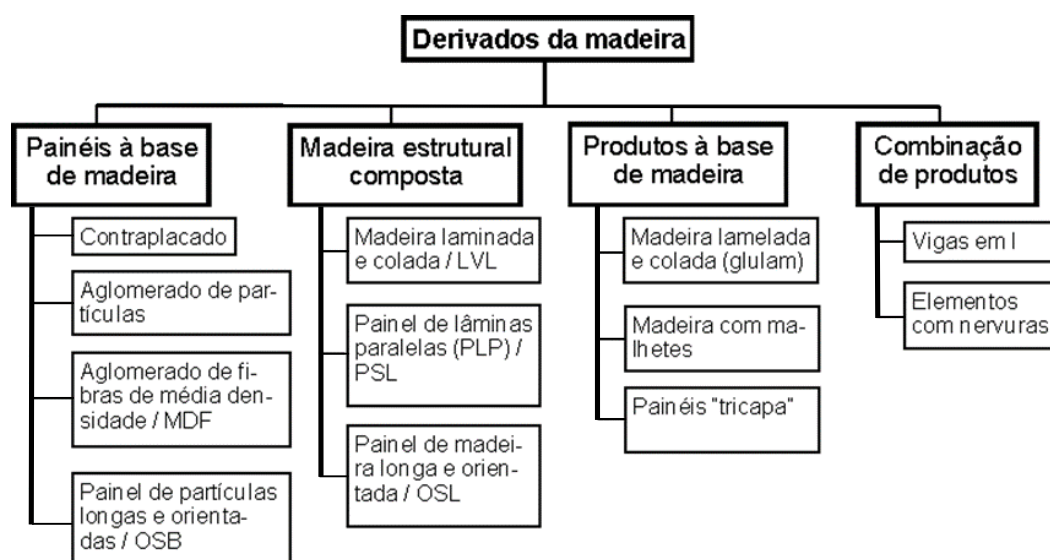


Fig. 3.1. - Produtos fabricados à base de madeira (adaptado para português) [3]

Os painéis compósitos à base de madeira abrangem uma vasta gama de densidades de madeira, o que é uma vantagem em termos de custo e disponibilidade. Podem também ser desenvolvidos para assegurar baixa condutividade térmica, boa absorção sonora, alta resistência ao fogo e agentes naturais. [19]

Muitos produtos finais podem ser obtidos da madeira, “*De 1000 combinações teóricas de elementos de madeira apenas 2% são usados hoje em dia (Marra, 1992) ”*, adaptado de Barbu, Reh, e Irle (2014), onde muitos dos processos de fabricação de compósitos à base de madeira conseguem dar uso a toros de baixa qualidade ou deformados, sendo uma boa opção de reciclar resíduos de madeira provenientes de demolições, florestas, agricultura, etc. [19]

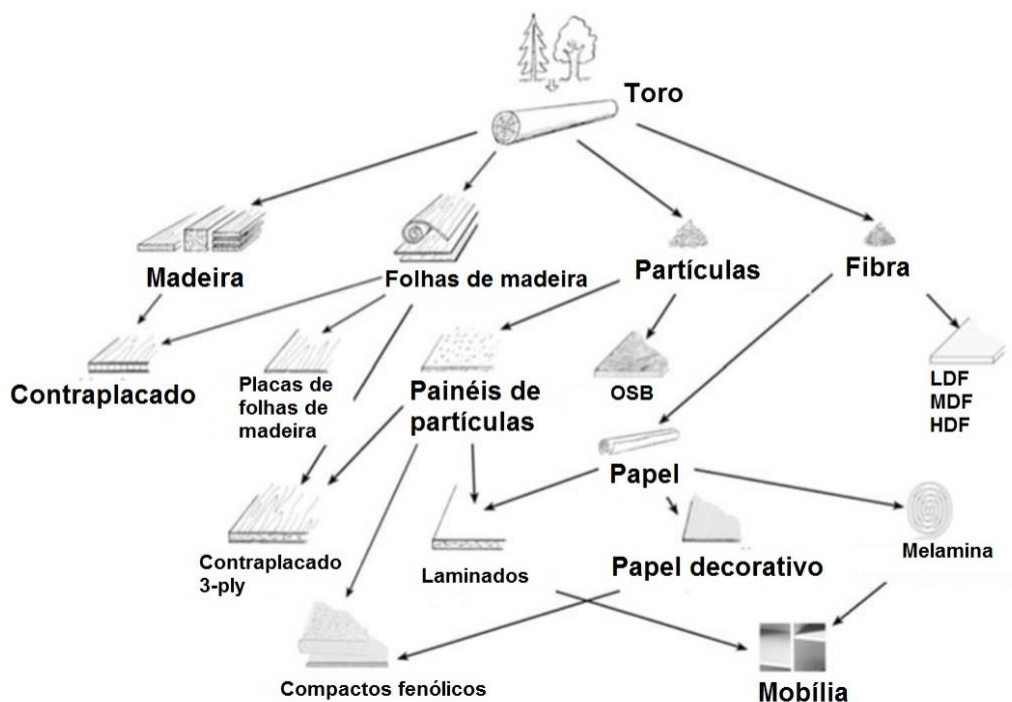


Fig. 3.2. - Produtos derivados da madeira (adaptado para português) [3]

O painel compósito à base de madeira e cimento é uma das combinações de madeira com um material inorgânico que permite a produção de compósitos com propriedades únicas. Resulta, sinteticamente, da mistura de partículas de madeira com cimento, sendo o mais utilizado o cimento Portland, e podem conter aditivos. A madeira é o agregado, confere consolidação, o cimento o ligante, a água é o reagente e os aditivos os catalisadores. [20]

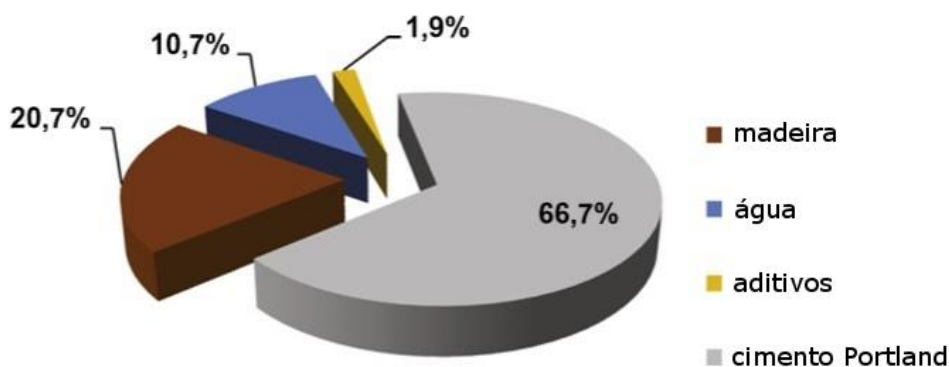


Fig. 3.3. - Composição painéis compósitos de partículas e cimento (adaptado para português) [4]

Segundo Macêdo, Souza, e Pompeu Neto (2012) a aceitação dos painéis de madeira cimento “*deve-se ao uso de aglomerante inorgânico, o que lhe confere propriedades superiores às chapas que utilizam resinas sintéticas, garantindo resistência ao fogo, ataque de fungos e cupins, além de isolamento térmico e acústico (LATORRACA, 2000).*” [21]

A inserção de cimento tem como finalidade a obtenção de benefícios ao nível da durabilidade, estabilidade, resistência ao fogo, humidade e outros fatores, facilidade de pintura e revestimento, e ainda a possibilidade de atribuir qualidades estruturais por parte dos painéis. [22]

O cimento quando combinado com água reage num processo designado hidratação que solidifica originando uma massa semelhante a uma pedra e que agrega todos os materiais. Os materiais compósitos com cimento Portland mais bem sucedidos consistem tanto em produtos à base de lã de madeira, de baixa densidade, como em produtos feitos com fibras e partículas, de alta densidade. [23]

CBPB (*cement bonded particle board*) é abreviatura para placas de aglomerado de partículas e cimento. CBWC (*cement bonded wood composite*) corresponde às placas compósitos de madeira e cimento, constituídas por 20% a 25% de partículas de madeira ligadas por cimento. *“Os painéis cimento-madeira são similares aos painéis aglomerados, sendo constituídos basicamente de partículas de madeira e um aglutinante de origem mineral, em substituição a resinas convencionais do tipo uréiaformaldeído. O processo envolvido no endurecimento do painel cimento-madeira decorre de reações exotérmicas resultantes da hidratação do cimento na presença de água.”* (Iwakiri et al. 2012) [24]

As técnicas de fabricação deste tipo de compósitos têm evoluído a fim de encurtar o tempo de fabrico em comparação com os métodos tradicionais. Tradicionalmente era requerido que os painéis ficassem de 8 horas a 24 horas sob pressão de uma braçadeira, seguido de 28 dias de cura. Por exemplo, com a técnica de injeção de CO₂ reduzem-se as 24 horas em minutos (menos de 5 minutos). Pozolana, um material silicioso ou sílico-aluminoso, como as cinzas volantes, pode ser utilizado como substituto parcial do cimento, tornando a produção mais económica e possibilitando um maior reaproveitamento de resíduos [25].

Os painéis compósitos de madeira e cimento são utilizados no setor da construção civil da Áustria desde 1920 e da Alemanha desde 1940 e tiveram sua expansão após a II Guerra Mundial. Durante a II Guerra Mundial a produção de resinas sintéticas evoluiu o que permitiu realizar os primeiros ensaios de painéis de partículas. [21]

A empresa alemã Torfit obteve entre 1938 e 1940 duas patentes de produção de painéis de partículas, estas partículas que eram aglomeradas com recurso a resinas líquidas. A primeira fábrica de produção destes painéis foi construída em Bremen (Alemanha) pela Torfit. Em 1943 Fahrni obteve a patente francesa de produção de painéis de partículas e mais tarde desenvolveu o equipamento para a indústria de painéis de partículas (Novopan). A produção em larga escala surgiu em 1976, na Alemanha, e expandiu para os Estados Unidos (*wood fiber cement*) e México (*cement-bonded particleboard*). [21]

Ao nível de mercado, o mais recente e forte concorrente a este tipo de compósitos é o setor da produção de energia através da biomassa. Esta concorrência e a crescente procura de madeira para fabrico destes produtos tem como consequência a mudança de políticas e o aumento de preços, com um decrescente diâmetro de toros e quantidade de lã de madeira na natureza. [19]

3.2. VIROC

Viroc é a referência comercial de um painel compósito constituído por uma mistura de partículas de madeira e cimento. “Combina a flexibilidade da madeira com a resistência e durabilidade do cimento” e apresenta uma composição não homogênea, característica natural do produto. [26]

Os painéis Viroc têm uma gama de 6 cores, dois tipos de textura, várias espessuras (dos 8mm aos 28/32 mm, dependendo da textura e da cor), específicas dimensões e um vasto conjunto de possíveis aplicações tanto no exterior como no interior: fachadas, paredes, pavimentos, coberturas, tetos, mobiliário, decoração de interiores, mobiliário urbano, cofragem perdida e outros. [26]

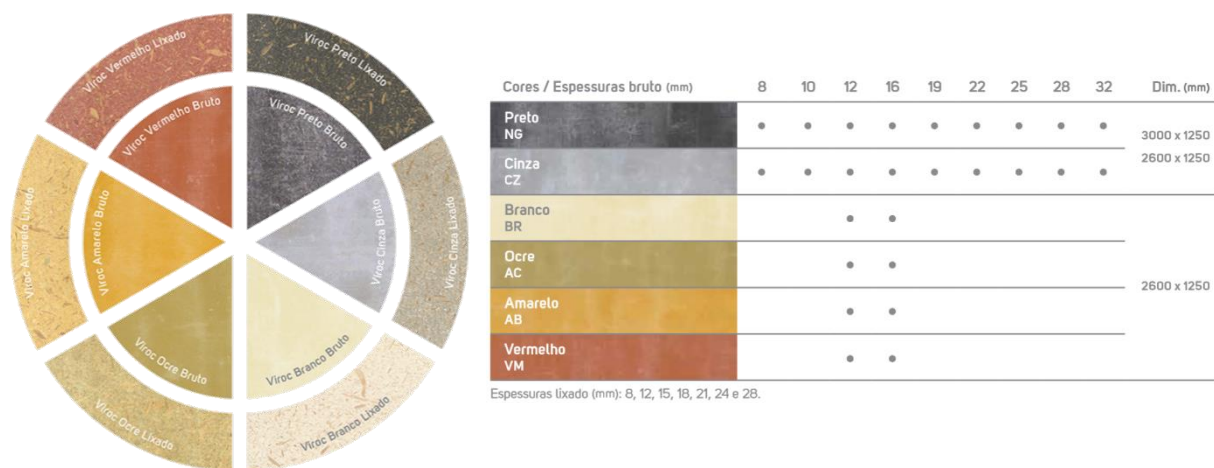


Fig. 3.4. (esq.) e 3.5. (dir.) - Variedade de cores, texturas e espessuras dos painéis Viroc. [5]

A composição dos diferentes painéis Viroc é em função da cor e, como se pode constatar, as composições são muito semelhantes às indicadas no capítulo 2.2, tratando-se, portanto, de um painel compósito à base de madeira cimento que não difere muito do comum.

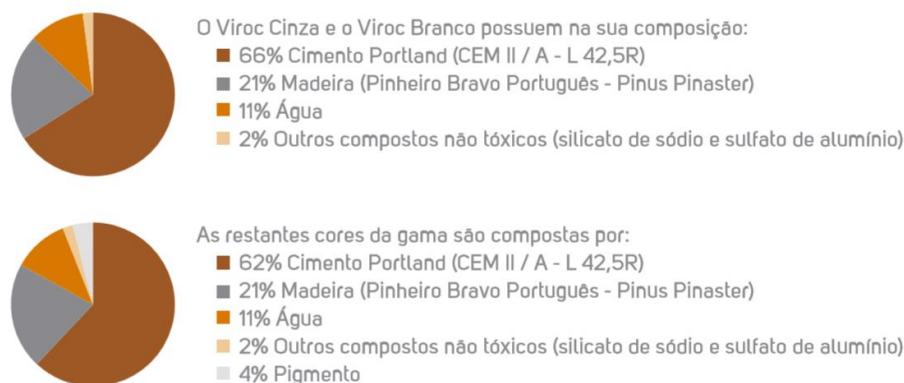


Fig. 3.6. - Composição dos diferentes tipos de painéis Viroc (percentagem por quilograma) [6]

3.2.1. CERTIFICAÇÕES

Segundo o dossier técnico [27], aos painéis Viroc a classificação CE garante diversas características:

- Módulo de elasticidade em flexão;
- Resistência à flexão;
- Resistência à tração;
- Durabilidade;
- Reação ao fogo;
- Fator de resistência ao vapor;
- Isolamento a sons aéreos;
- Absorção sonora;
- Condutibilidade térmica;
- Resistência ao Impacto;
- Durabilidade mecânica;
- Resistência aos agentes biológicos.

A certificação ICC [27] garante ao painel Viroc resultados em termos de:

- Desempenho contra incêndio;
- Controlo da transmissão de som;
- Condutividade e resistência térmica;
- Revestimentos exteriores;
- Desempenho estrutural.

Os sistemas de tetos e pavimentos Viroc são testados e certificados pela Underwriters Laboratories (UL), uma organização independente de certificação de segurança de produtos, relativamente à resistência ao fogo. [27]

Todas estas características que são asseguradas por estas entidades permitem prever várias soluções onde se pode inserir estes painéis.

Na dissertação de Pinto (2010), em que o alvo de estudo foram soluções de paredes leves de placas de compósitos madeira e cimento, concluiu-se que os painéis Viroc cumprem as exigências de revestimento exterior e interior, as suas características melhoram com o passar do tempo (pelo menos nos primeiros 2 anos). A classificação reVETIR dada por Pinto (2010) ao painel de Viroc é r2 e2 V1-2 E4 T3I3 R4 (r: reparação, e: manutenção, V: resistência ao vento, E: estanqueidade à água, T: resistência ao choque, I: reação ao fogo, R: resistência térmica). [28]

3.2.2. AO NÍVEL DA ACÚSTICA

Ao nível da correção acústica, através de modelos teóricos (*software* WinFLAG) e ensaios experimentais (câmara reverberante da FEUP) aos painéis Viroc, presentes na tese de Ferreira (2010), verificou-se que aumentando a espessura do espaço de ar no sistema “*painéis Viroc perfurados+tela+lã de rocha 4cm+espaço de ar*” consegue-se aumentar o coeficiente de absorção sonora, especialmente nas baixas frequências, resultado do facto de o sistema funcionar como ressoador de cavidade. O aumento da taxa de furação dos painéis conduz a melhores resultados, aumentando o espectro de eficiência do painel.[29]

Segundo o dossier técnico [27], ao nível do isolamento sonoro, a redução sonora dos painéis Viroc está compreendida entre, no mínimo, 30 dB e, no máximo, 35 a 37dB, consoante a classe ou espessura do painel.

Os painéis compósitos à base de madeira cimento com fins acústicos são igualmente produtos de outras empresas, como é o caso do painel Amroc-Acoustic da Amroc [30], Cetriss[®]Akustic da Cetriss [31] e Duripanel da Euronit [32], nomeando os mais conhecidos, em que os valores de redução sonora apresentados nos dossiers técnicos são aproximadamente os mesmos, entre os 30 dB e os 35/37 dB, aumentando igualmente com o aumento de espessura .

3.2.3. A EMPRESA

Viroc Portugal – Indústrias de Madeira e Cimento, SA é uma empresa constituída em 1992, sediada em Setúbal, que se dedica à produção de painéis de cimento madeira. Desde a sua formação que procura um lugar no mercado português, embora grande parte da sua produção seja destinada à exportação, cerca de 75% no ano de 2010. [33]

Em 2013 entrou na “*esfera de gestão da Investwood*” [34], com a alteração do respetivo logótipo. O grupo Investwood, SA é uma empresa portuguesa que gere a produção e a comercialização de painéis de fibras de madeira e painéis de cimento e madeira.



Fig.3.7. - Alteração do logótipo da Viroc. [7]

Além da unidade fabril de Viroc em Setúbal, também detém as unidades fabris IFM (Indústria de Fibras de Madeira S.A) localizada em Tomar [35], adquirida em 2010 recuperando-a de um estado de insolvência [36], e que se dedica à produção de painéis de fibras de madeira (*hardboard*) conhecidos pela marca Platex[®] em Portugal e Valbonite no resto do mundo, e a unidade fabril Valbopan, SA em Famalicão da Nazaré, constituída em Agosto de 1988 e uma das mais pequenas unidades produtoras de MDF da Europa, onde se produzem painéis de fibras de madeira Valbopan[®] e Valchromat[®], utilizando madeira de pinho. [35]

4

SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DA CASA CLÁSSICA PORTO BURGUEÊS

4.1. A CASA BURGUESA

Durante o século XVII surgiram as casas burguesas na cidade do Porto. As casas burguesas são caracteristicamente dispostas em banda, separadas por paredes de meiação, compridas, cerca de 18m de profundidade, e estreitas em largura, cerca de 6 m de largura [37] e organizam-se segundo a caixa de escadas. Na cobertura, tipicamente na zona da caixa de escadas, existe uma clarabóia a iluminar as escadas e as divisões junto a estas [38]. As restantes divisões são iluminadas pelas fachadas da rua e logradouro.

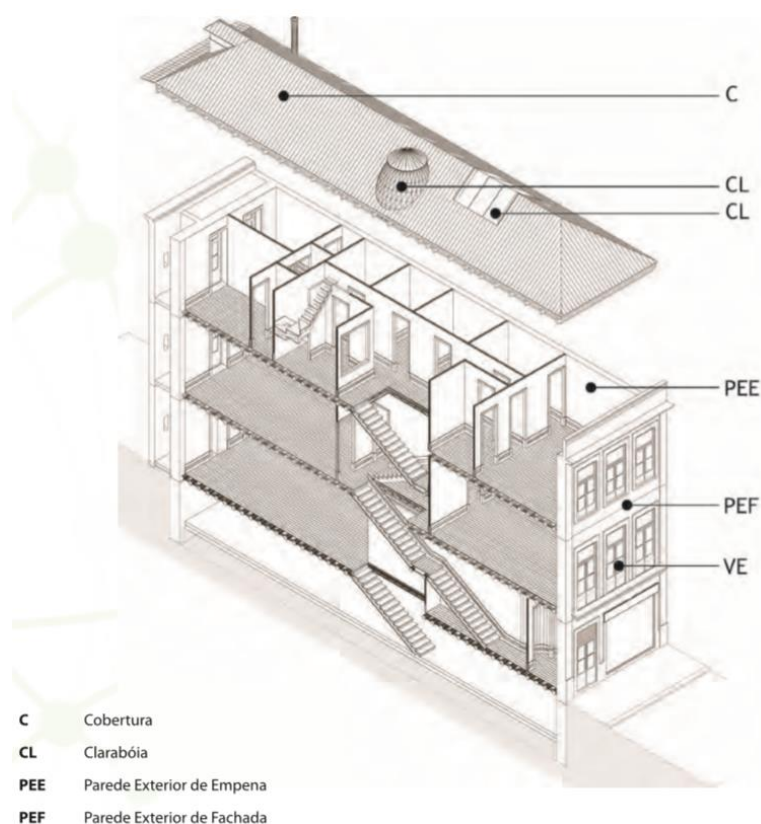


Fig. 4.1. - Casa clássica do Porto burgueses.[8]

A arquitetura das casas burguesas sofreu processos de transformação desde o seu aparecimento e correntemente é distinguida por três períodos:

- período mercantilista: mais antigo, sem logradouro, 2 ou 3 pisos e polifuncional;
- período iluminista: logradouro de várias dimensões, maior área de lote e frente estreita;
- período liberal: cave e rés-do-chão, monofuncional e de duas frentes.

Em termos de materiais, a construção assentava no uso de materiais tradicionais do norte de Portugal. Apesar de com o decorrer dos períodos alguns materiais terem sido alterados, os mais encontrados são [39]:

- pedra – granito utilizado nas paredes exteriores e de meação;
- madeira – madeira de castanho e, em certos casos, Pinho de Riga para o vigamento dos sobrados e estrutura das coberturas; pinho nacional para as estruturas e revestimentos dos tabiques, soalhos e caixilharias exteriores e interiores;
- cal – usada como ligante para a constituição das argamassas;
- gesso – utilizado essencialmente na composição do estuque;
- argamassa – utilizada no assentamento e revestimento de alvenarias;
- areia – usada como agregado para a constituição das argamassas;
- ferro – aplicado na execução de grandes varandas, ferragens, canalizações, caixilhos e elementos decorativos;
- chapa de zinco – aplicado nas caleiras, tubos de queda de águas pluviais, revestimento de paredes de meação;
- telha – empregue na cobertura inicialmente a telha Caleira Portuguesa e, mais tarde, a telha Marselha;
- azulejo – utilizado como revestimento exterior de fachadas;
- tinta – aplicada como revestimento nas superfícies de reboco ou de estuque exteriores;
- asfalto – usado na impermeabilização das paredes exteriores;
- betume – usado de diversas formas, como por exemplo como massa de vidraceiro.

4.2. TIPIFICAÇÃO DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DA CASA BURGUESA

A seguinte descrição é apenas referente às soluções mais comuns da clássica casa burguesa da cidade do Porto do século XIX, e que mais à frente algumas serão alvo de estudo acústico.

4.2.1. PAREDES EXTERIORES

As paredes exteriores têm espessuras variáveis, geralmente, entre os 30cm e os 80cm. Espessuras acentuadas por se tratarem de elementos autoportantes, dependentes das dimensões dos vãos. [39]

As soluções mais comuns de paredes exteriores são em alvenaria de granito aparelhada ou de tabique. A parede de tabique pode ser encontrada na continuação das paredes de pedra e nas paredes exteriores de pisos recuados. [40]

Além destas, é ainda possível encontrar soluções de paredes exteriores mistas, como em pedra e tijolo ou em madeira e tijolo. [40] As paredes com pedra e tijolo são constituídas por dois panos, um em pedra e outro em tijolo, justapostos. As paredes de tabique misto de tijolo e madeira são constituídas por uma estrutura de madeira em gaiola, preenchida interiormente por argamassa e pedaços de pedra ou tijolos maciços. [39] As paredes exteriores em tabique são soluções semelhantes às usadas em paredes interiores.

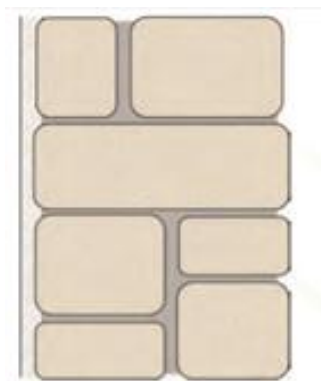


Fig. 4.2. – Parede exterior em pedra da casa do Porto burguês. [8]

4.2.2. PAREDES INTERIORES

São paredes de reduzida espessura, entre os 7 e 12 cm, cuja solução mais corrente é composta por um fasquiado, constituído por pequenas régua de madeira de secção trapezoidal pregadas perpendicularmente a um duplo tabuado com 4 a 5 cm de espessura disposto na vertical e na diagonal, e sobre o qual adere o reboco. [40]

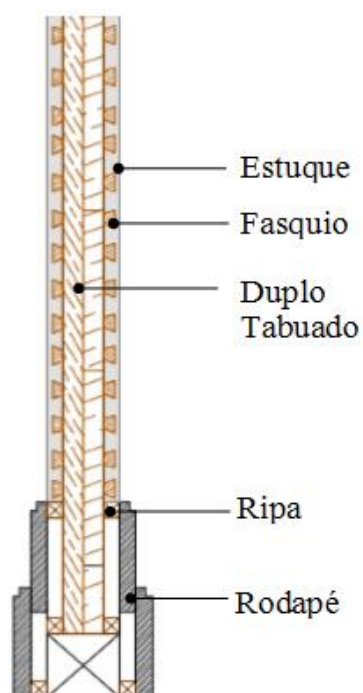


Fig. 4.3. – Esquema de parede interior.



Fig. 4.4. – Fotografia de parede de tabique simples (tabuado na vertical e fasquiado na horizontal). [9]

4.2.3. PAREDES DE MEAÇÃO

As paredes de meação têm função estrutural, suporte da cobertura e dos pavimentos, e onde apoiam outros elementos como os algerozes. São paredes de menor espessura que as paredes exteriores de fachada, normalmente com 60cm, e podem ser em alvenaria de pedra ou tabique misto, preenchidas no seu interior com argamassa, de composição semelhante às paredes exteriores. [40]

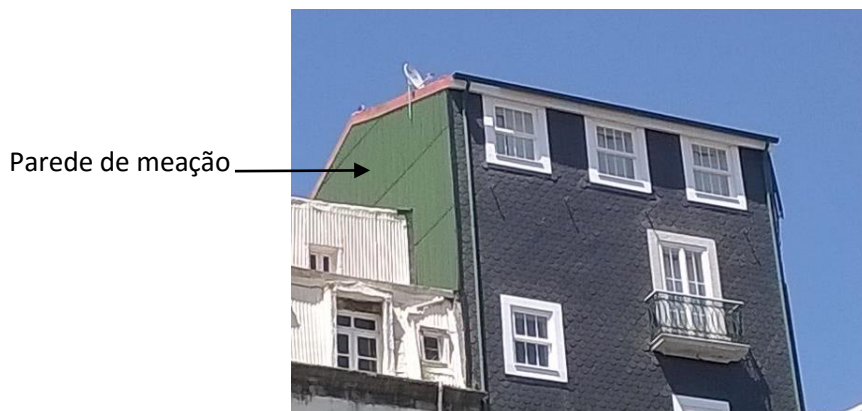


Fig. 4.5. - Fotografia de habitação clássica do Porto burguês, pormenor da parede de meação.

4.2.4. PAVIMENTOS

Enquanto que os pavimentos térreos são compostos por revestimentos sobre terra batida ou pedra, os pavimentos acima do térreo têm como estrutura principal vigamentos de troncos de madeira dispostos paralelamente, com diâmetros entre os 20 e os 30 cm, comprimentos que não ultrapassam os 7m e espaçados de 50-70 cm. A partir do século XX estes vigamentos passaram a ser vigas de madeira de menores dimensões, de 8 a 12 cm de largura e com alturas até aos 20 ou 25cm, espaçadas de 50cm. Transversalmente aos vigamentos estão os tarugos, de secção de menor dimensão, espaçados entre si cerca de 1,5 m. Como estrutura secundária, existem elementos que sustentam os revestimentos que são barrotes e fasquios em madeira. [39]

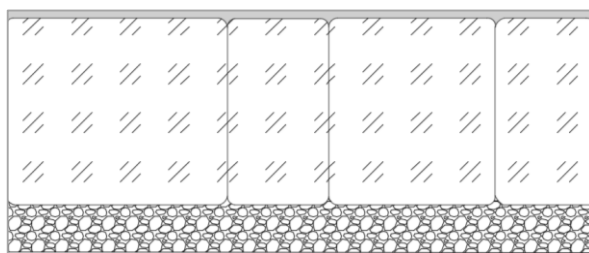


Fig. 4.6. – Esquema Pavimento térreo da casa clássica do Porto burguês.

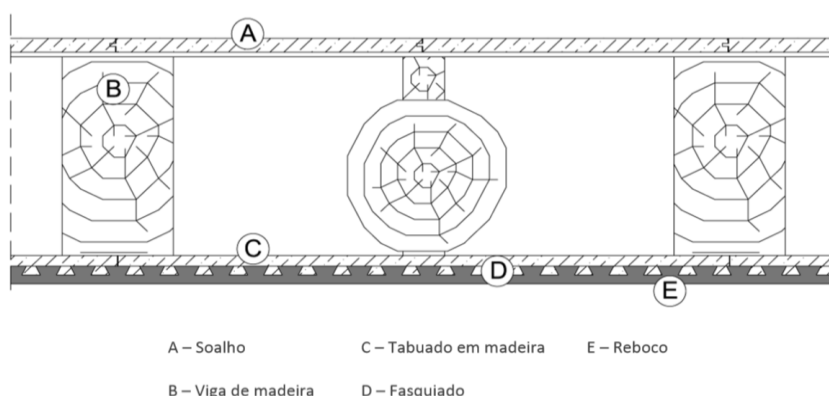


Fig. 4.7. – Tipologia dos pavimentos. [10]

4.2.5. COBERTURA

A típica cobertura inclinada é composta por asnas, apoiadas nas paredes de meação e espaçadas entre si de 3 m, cuja pendente varia entre os 20° e os 30° e pode vencer vãos até aos 8 m. [40]

O exemplo mais antigo destas coberturas é a cobertura constituída por asnas simples. A estrutura da asna simples é feita por uma armação simples de duas vigas (pernas) que formam a pendente ao telhado, e são travadas transversalmente por outra viga transversal (linha) que apoia nas paredes de meação. [40]

A asna complexa, mais recente e derivada da asna simples, caracteriza-se por, além dos elementos da asna simples, conter elementos de menor dimensão (escoras e o pendural) na sua geometria, que fazem ligação por meio de estribos entre as pernas e a linha da asna. [40]

Os frechais, as madres e a fileira são elementos de travamento longitudinal sobre os quais assenta a estrutura de suporte do revestimento: varas, forro e a ripa, e onde vão assentar as telhas. [41]

É característico o desvão ser não útil, sendo visível ainda em algumas casas a estrutura de madeira pelo interior, as asnas (ver Fig.4.9.). Todavia, com o passar dos anos, em algumas casas alterações foram feitas e passou a existir uma laje de esteira a encobrir a estrutura da cobertura inclinada ou para aproveitamento deste desvão, através de um tabuado e fasquiado, tal como nos pavimentos, pregado diretamente à linha (asna) ou por intermédio de barrote.

Nas coberturas, interrompendo a estrutura de madeira, é comum existir uma claraboia. Podem ser clarabóias quadrangulares ou retangulares, com os lanternins ao correr das águas, ou clarabóias circulares ou elípticas, com os lanternins em forma de pequenas cúpulas de vidro. [41]

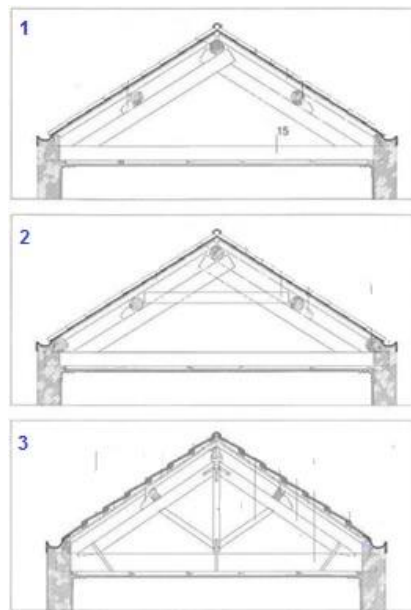


Fig. 4.8. - Asna simples e asna complexa: 1 – asna simples; 2 – asna simples com nível; 3 - asna complexa -com pendural e escoras (adaptado de [11])



Fig. 4.9. – Fotografia de cobertura inclinada e teto (vistos do interior). [9]



Fig. 4.10. – Fotografia de uma clarabóia. [8]

4.2.6. REVESTIMENTOS E ACABAMENTOS

Em paredes exteriores é típico encontrar-se revestimentos com cerâmicos ou apenas com emboço, rebocadas e acabamento em estuque caiado ou pintado. [39]

Nas paredes de meiação os revestimentos baseiam-se em barramento de asfalto com ou sem chapa de zinco, emboço, reboco e acabamento em estuque caiado ou pintado. [39]

Em pavimentos o revestimento superior é um tabuado de madeira (soalho), com espessuras que variam entre os 2,5 e os 5 cm, unido por encaixe e pregado ao vigamento, e o teto (revestimento inferior) é constituído por um forro materializado por tábuas de madeira pregadas ao vigamento principal, sobre o qual é fixo o fasquio, e por fim um revestimento à base de argamassa e acabamento em estuque (gesso) [40].

Os pavimentos térreos são geralmente sobre terra batida ou pedra revestidos com lajetas de pedra, ladrilhos cerâmicos ou sobrados de madeira.

Nas coberturas a estrutura de suporte do revestimento é constituída pelas ripas, pelas tábuas de forro, pelas varas e pela telha Marselha. [40]

4.2.7. PORTAS

As portas exteriores que podem ser encontradas em muitas habitações portuenses são esguias e robustas, compostas por duas folhas totalmente fechadas ou com pequenos postigos, com caixilhos envidraçados e protegidos por uma grade em ferro. Na parte superior destas portas é usual existir uma bandeira, em caixilho envidraçado e protegido por uma grade de ferro, que se destina a iluminar o espaço de entrada. A grande maioria destas soluções é concretizada em madeira, pinho, ou em castanho nas casas mais abastadas. [41]

As portas interiores, construídas com madeira de pinho ou casquinha, compostas por uma ou duas folhas de abrir, e encimadas igualmente por uma bandeira com caixilho em vidro nos compartimentos principais. Estas portas estão ligadas às paredes em tabique através de dobradiças fixas aos aros, formados por uma esquadria de tábuas com o perfil e cerca de 3 cm de espessura do batente. [41]

4.2.8. VÃOS ENVIDRAÇADOS

Os vãos envidraçados são compostos predominantemente por caixilharias em madeira ou metal (ferro) associadas a vidro simples com espessuras entre os 3 e os 5 mm. Estas soluções estão acompanhadas por uma proteção solar interior, portadas em madeira, que recolhem dentro da espessura da parede disponível. Distinguem-se duas formas de abertura correntes no edificado desta época: em guilhotina e de batente com duas folhas. Os tipos de madeira mais encontrados nos vãos envidraçados são o pinho, a casquinha e o castanho em soluções mais abastadas. [41]

4.2.9. RESTANTES ELEMENTOS

Para uma descrição mais detalhada dos elementos já descritos e dos restantes elementos que compõem a casa burguesa portuense (algerozes, beirado, cachorros, cornijas, platibandas, chaminés, varandas, marquises, etc.), mas que não demonstram relevância para este trabalho, recomenda-se a leitura do documento “*Descrição do sistema construtivo da casa burguesa do Porto entre os séculos XVII e XIX*” de Teixeira (2004). [41]

5

MÉTODOS DE PREVISÃO CARACTERIZAÇÃO DE TRANSMISSÃO SONORA

5.1. INTRODUÇÃO

Antigamente, antes das grandes publicações científicas na área da acústica, a metodologia usada para a caracterização do comportamento acústico de materiais ou de uma certa solução construtiva baseava-se na experiência, do que já tinha sido realizado, como edifícios existentes ou ensaios simples e rudimentares. Atualmente existe um conjunto vasto de métodos que permitem prever e caracterizar a transmissão sonora. Os métodos mais conhecidos foram apresentados sinteticamente no capítulo 2.1.1. Mais intuitivos ou mais complexos, estes métodos formulados por cientistas são bastantes utilizados e alguns têm sido aperfeiçoados ao longo dos anos, permitindo obter uma estimativa da redução sonora e, por meio de outras metodologias, determinar índices de isolamento sonoro muito próximos da realidade e prever o que aconteceria, simulando a solução construída.

5.2. ESCOLHA DO MÉTODO

A caracterização da transmissão sonora com resultados mais fidedignos seria obtida usando métodos que assentam em modelos de cálculo automático mais detalhados, como o Método dos Elementos Finitos. Contudo, como o tempo disponível para a elaboração deste trabalho não é suficiente nem para aprender este método nem, supondo, para a sua correta aplicação, optou-se por apenas utilizar métodos mais simples que recorrem a trabalhos de especialista acústicos (Sharp, Cremer, etc.) ou aos métodos descritos na norma EN 12354.

Nos próximos capítulos 7, 8 e 9, a caracterização da transmissão sonora das soluções construtivas existentes (capítulo 7), a caracterização da transmissão sonora das soluções acusticamente reabilitadas (capítulo 8) e outras caracterizações sonoras realizadas nas conclusões e considerações finais (capítulo 9) serão feitas referências às seguintes metodologias: um método que engloba expressões formuladas por Sharp, Cremer e Fahy, com pequenas correções, o método descrito no livro “*Engineer Noise Control*” que utiliza expressões formuladas por Sharp, Davy e Heckl, e os métodos normalizados, correspondentes à EN 12354-1 e EN 12354-2.

Na primeira metodologia, as expressões são versões corrigidas e melhoradas, embora a equação original esteja bem presente. Este método prevê o índice de redução sonora R para cada frequência.

A segunda metodologia é muito semelhante à primeira, descreve as expressões na sua forma original, sem ajustes posteriores à sua criação, por vezes numa forma mais complexa, mas facilita este trabalho como ferramenta de comparação e análise.

A metodologia da EN12354-1 e EN12354-2 contém um método simplificado e um método detalhado. A diferença entre estes encontra-se na quantidade de cálculos e de informação requerida para a sua utilização. Ambos permitem quantificar índices que contabilizam tanto a transmissão direta como as transmissões marginais.

A caracterização da transmissão de sons de condução aérea, relacionada com as soluções de pavimentos, paredes interiores em tabique e as coberturas, é feita com recurso a resultados de ensaios laboratoriais, descritos no capítulo 6, e através da aplicação da metodologia teórica baseada em Sharp, Cremer e Fahy. A escolha desta metodologia em vez da baseada no livro “*Noise Engineering Control*” assenta no facto de a primeira metodologia abordar expressões que, apesar de também estarem presentes no livro, são mais ajustadas ao cálculo que se vai fazer, pois contém as devidas correções baseadas num conjunto de dados de ensaios e experiências, a possibilidade de simular paredes duplas com mais cenários e mais realistas que recorrem, por exemplo, a diferentes tipos de espaçadores, e ainda a possibilidade de simular numa rotina informática como o programa Insul.

O conjunto de correções às expressões tornou então a metodologia baseada em Sharp, Cremer e Fahy mais fiável, com um maior grau de aceitação e, portanto, com resultados que melhor se consideram ser mais próximos da realidade. Contudo, caso determinados resultados do cálculo com recurso a esta metodologia cause algum tipo de dúvida, para comparação, utiliza-se a metodologia do livro a fim de saber se o erro é dos fatores de correção associados à primeira metodologia. Por outro lado, a simples descrição e explicação das matérias abordadas neste livro ajudam a conhecer melhor as expressões e alargar os limites do conhecimento sobre as metodologias de previsão acústica em que se baseia a metodologia de Sharp, Cremer e Fahy.

Os métodos descritos na norma EN12354-1 permitem, com os diferentes valores dos índices de redução sonora da envolvente e do elemento de separação, obter o índice de redução sonora que contabiliza também o efeito das transmissões marginais e, analiticamente, o isolamento sonoro.

A caracterização da transmissão sonora a sons de percussão, relacionada com os pavimentos, vai ser realizada com recurso aos resultados obtidos dos ensaios laboratoriais realizados no Laboratório de Acústica da FEUP, descritos no capítulo 6, e vai ser referenciado o método presente na EN12354-2 que permite a determinação de índices de isolamento a sons de percussão que contabilizam as transmissões marginais.

5.3. MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO

5.3.1. MÉTODO BASEADO EM SHARP, CREMER E FAHY

Sharp, Cremer e Fahy desenvolveram várias expressões para o cálculo da redução sonora para diferentes tipos de soluções. Segundo Ballagh (2004), para uma gama de frequências entre 50Hz e 5000Hz pode-se trabalhar com uma metodologia teórica que, tendo em consideração a tipologia construtiva em causa, permite determinar a redução sonora de sistemas construtivos recorrendo às equações 5.1 até 5.10. A diferença média entre o cálculo teórico com base nesta metodologia e resultados experimentais (publicados pela National Research Council, NRC, no Canadá correspondentes a ensaios a 240 paredes e pavimentos – ver Fig5.2.) é menor que 0,5 dB e 90% dos resultados rondam os $\pm 2,5$ dB de diferença, como se pode observar pela Fig.5.1. Segundo Ballagh (2004) esta precisão é aceitável dado que a

repetibilidade e reprodutibilidade das medições nos laboratórios não é provavelmente melhor que $\pm 1,5$ a ± 2 dB. [42]

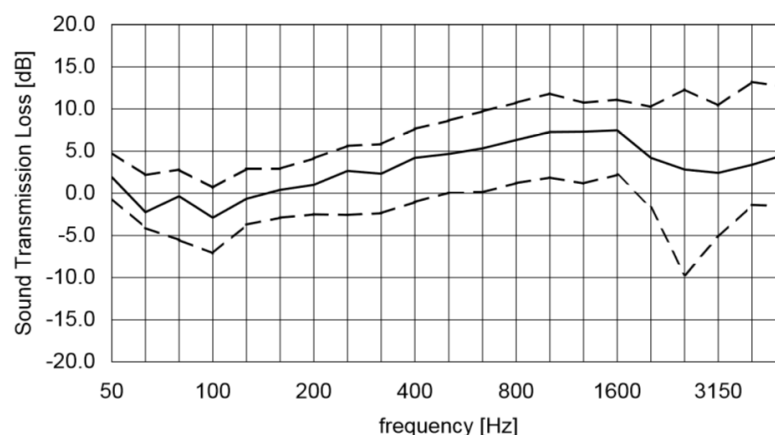


Fig 5.1. - Diferença entre metodologia teórica e resultados experimentais de NRC a 132 paredes da referência [13] (--- limite dos 10% e 90%, — erro médio). [12]

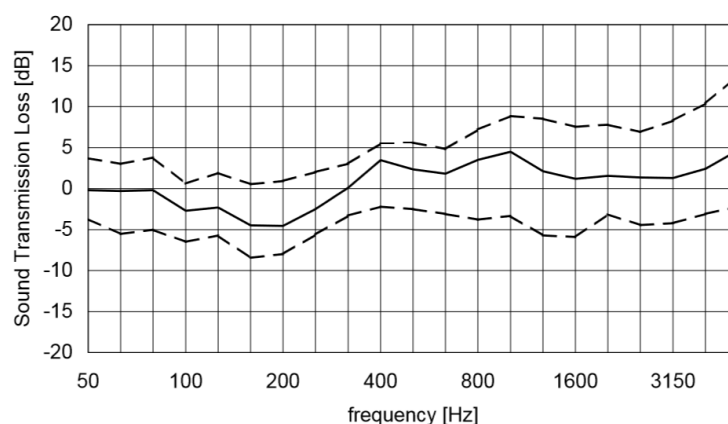


Fig 5.2- Diferença entre metodologia teórica e resultados experimentais de NRC de 132 pavimentos da referência [14] (--- limite dos 10% e 90%, — erro médio). [12]

Os pavimentos têm apenas um erro médio pequeno dentro de toda a gama de frequências enquanto o método quando aplicado a paredes tende a subestimar cerca de 5 dB para frequências médias [42].

A seguinte descrição do cálculo da redução sonora usado por este método é dividida pelas diferentes tipologias construtivas mais comuns: paredes simples e paredes duplas.

Quando o caso é de parede simples (homogênea), a redução sonora é igual a [42]:

- para frequências baixas e médias o R é dado pela equação de Fahy:

$$R = 20 \cdot \log(m \cdot f) - 48 \quad [\text{dB}] \quad (5.1)$$

- para altas frequências, tendo em consideração o efeito de coincidência, a redução sonora é dada pela equação de Cremer:

$$R = 20 \cdot \log(m \cdot f) - 10 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot \eta \cdot f}{\pi \cdot f_c}\right) - 47 \quad (5.2)$$

$$R = 20 \cdot \log(m \cdot f) - 10 \cdot \log\left(2 \cdot h \cdot \frac{w}{\rho \cdot w \cdot c}\right) - 47 \text{ [dB]} \quad (5.3)$$

Esta diferença das altas frequências em relação às baixas e médias frequências tem como explicação a existência da frequência crítica, frequência consequente de o comprimento de onda da parede coincidir com o comprimento de onda transmitida. [42]

No caso de paredes duplas, dois panos de parede separados por caixa de ar, são usadas as equações de Sharp [42]:

$$R = 20 \cdot \log(f(m_1 + m_2)) - 47 \text{ [dB]}, f < f_0 \quad (5.4)$$

$$R = R_1 + R_2 + 20 \cdot \log(f \cdot d) - 29 \text{ [dB]}, f_0 < f < f_1 \quad (5.5)$$

$$R = R_1 + R_2 + 20 \cdot \log(f \cdot d) - 29 \text{ [dB]}, f_0 < f < f_1 \quad (5.6)$$

m_1 e m_2 : massa superficial de cada pano

d : espessura da caixa de ar

f_0 : frequência de ressonância do sistema massa-ar-massa

onde, $f_1 = 55/d \text{ [Hz]} \quad (5.7)$

f_1 : frequência do primeiro pano da parede dupla

e R_1 e R_2 são calculados com a expressão 5.2 ou 5.3.

Para as altas frequências, Fahy apresenta ainda uma solução alternativa [42]:

$$R = R_1 + R_2 + 8,6 \cdot a \cdot d + 20 \cdot \log\left(\frac{b}{k}\right) \text{ [dB]}, f > f_1 \quad (5.8)$$

Onde a e b são as partes real e imaginária do coeficiente de propagação do pano absorvente e k é o número de onda.

Ainda nas paredes duplas, a maioria das soluções construtivas tem algum tipo de conexão entre paredes, quer seja uma conexão sólida ou resiliente. Tendo este aspeto em consideração, Sharp desenvolveu relações relativamente simples para cálculo da redução sonora de paredes duplas com conexões pontuais ou lineares [42]:

$$R = R_{1+2} + 20 \cdot \log(e \cdot f_c) + 20 \cdot \log\left[\frac{m_1}{m_1 + m_2}\right] - 45 \text{ [dB]} \quad (5.9)$$

$$R = R_{1+2} + 10 \cdot \log(b \cdot f_c) + 20 \cdot \log\left[\frac{m_1}{m_1 + m_2}\right] - 18 \text{ [dB]} \quad (5.10)$$

Em que e e b são a distância entre o ponto ou a linha, respetivamente. Estas equações apenas se aplicam a frequências abaixo da frequência crítica de ambos as paredes. Usando expressões de análise estatística de energia é possível obter equações para frequências acima da frequência crítica de ambos as paredes.

Em suma, o cálculo da redução sonora de elementos e sistemas típicos de construção leve ou pesada pode ser previsto com alguma precisão, nas frequências entre 50Hz e 5000Hz, usando estas expressões simples, práticas [42] e que têm sido ajustadas consoante resultados de ensaios laboratoriais de modo a simularem mais fielmente a realidade.

5.3.2. MÉTODOS DESCRITOS NO LIVRO “NOISE ENGINEERING CONTROL” DE BIES & HANSEN

No livro “*Noise Engineering Control*” Bies e Hansen [43] descrevem algumas expressões já referidas anteriormente e outras derivadas por Davy e Heckl que se destinam ao mesmo fim, à caracterização sonora. Esta descrição que se faz dos diferentes trabalhos de autores conhecidos na área da acústica ajudará a conhecer melhor as expressões que preveem o isolamento sonoro e pelas razões já mencionadas em 5.2.

Dividindo por autor é possível obter as seguintes expressões para o cálculo da redução sonora [43].

Segundo trabalhos de Sharp [43]:

Sharp (1973) demonstrou que uma boa correlação entre a previsão e a medição com a lei da massa é obtida, para painéis simples, com a θ_L igual a 85° .

A redução sonora no campo de incidência na gama de frequências da lei da massa inferiores a $f_c/2$ para paredes simples e $f_{c1}/2$ para paredes duplas é igual a:

$$R = 20 \log_{10}[\pi f m / (\rho c)] - 5.5 \text{ [dB]} \quad (5.11)$$

(Não é válido para frequências inferiores a 1,5 vezes a frequência de ressonância do primeiro pano, mas abaixo desta frequência corresponde satisfatoriamente com as medições feitas em bandas de 1/3 de oitava. Para bandas de uma oitava, o valor 5,5 deve ser substituído por 4,0.)

Para frequências iguais ou superiores à frequência crítica, Sharp apresenta a seguinte equação para paredes simples:

$$R = 20 \log_{10}[\pi f m / (\rho c)] + 10 \log_{10}[2\eta f / (\pi f_c)] \text{ [dB]} \quad (5.12)$$

Em suma, as equações de Sharp resultam nos dois gráficos da Fig.5.3. O gráfico da esquerda, para paredes simples, os pontos no gráfico são calculados da seguinte forma:

$$\text{Ponto A: } R = 20 \cdot \log_{10}(f_c \cdot m) - 54 \text{ [dB]} \quad (5.13)$$

$$\text{Ponto B: } R = 20 \cdot \log_{10}(f_c \cdot m) + 10 \cdot \log_{10}(\eta) - 45 \text{ [dB]} \quad (5.14)$$

O gráfico da direita, que é para paredes duplas, com as frequências críticas f_{c1} e f_{c2} e reduzido fator de amortecimento, os pontos são determinados da seguinte forma:

$$\text{Ponto A: } R = 20 \cdot \log_{10}(f_c \cdot m) - 54 \text{ [dB]} \quad (5.15)$$

$$\text{Entre B e C: } R = 20 \cdot \log_{10}(f) + 10 \cdot \log_{10}(m) - 10 \cdot \log_{10}(f_{c1}) - 20 \cdot \log_{10}[\ln(4 \cdot f / f_{c1})] - 13,2 \text{ [dB]} \quad (5.16)$$

$$\text{Ponto D: } R = 10 \cdot \log_{10}(m) + 15 \cdot \log_{10}(f_{c2}) - 5 \cdot \log_{10}(f_{c1}) - 17 \text{ [dB]} \quad (5.17)$$

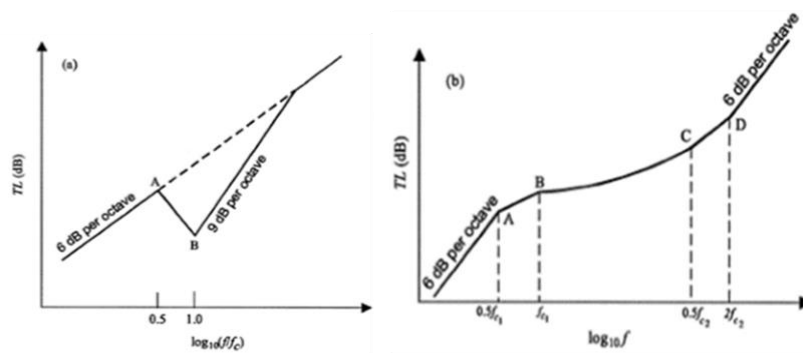


Fig 5.3- Modelo de Sharp para paredes simples (gráfico da esquerda) e duplas (gráfico da direita) [15]

Segundo trabalhos de Davy [43]:

Davy (1990) propôs a seguinte equação, que foi aclamada ser mais eficiente e por permitir variar o ângulo limite θ_L :

Para $f \leq 0,95f_c$:

$$R = 20 \cdot \log_{10} \left[\pi \cdot f \cdot \frac{m}{\rho \cdot c} \right] + 20 \cdot \log_{10} \left[1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right] - 10 \cdot \log_{10} \left[\ln \left(\frac{1+a^2}{1+a^2 \cdot \cos \theta_L} \right) \right] \text{ [dB]} \quad (5.18)$$

em que

$$a = \left(\frac{\pi \cdot f \cdot m}{\rho \cdot c} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right] \quad (5.19)$$

Para $f \geq 1,2f_c$:

$$R = 20 \cdot \log_{10} \left[\pi \cdot f \cdot \frac{m}{\rho \cdot c} \right] + 10 \cdot \log_{10} \left[\left(\frac{2 \cdot \eta}{\pi} \right) \cdot \left(\frac{f}{f_c} - 1 \right) \right] \text{ [dB]} \quad (5.20)$$

Para frequências próximas de f_c :

$$R = 20 \cdot \log_{10} \left[\frac{2 \cdot \eta \cdot \Delta b}{\pi} \right] \text{ [dB]} , 0,95 \cdot f_c < f < 1,2 \cdot f_c \quad (5.21)$$

em que

$$\Delta b = 0,236 \text{ para bandas de } \frac{1}{3} \text{ de oitava}$$

$$\Delta b = 0,707 \text{ para bandas de oitava}$$

O método de Davy é, na maioria dos casos, mais eficaz nas baixas frequências, enquanto que o método de Sharp apresenta melhores resultados em frequências próximas da frequência crítica do painel.

Segundo trabalhos de Heckl [43]:

Heckl, para o caso de paredes duplas, chegou à equação (admitindo $p \cdot c = 414$):

$$R = 20 \cdot \log_{10} f + 10 \cdot \log_{10} m - 10 \cdot \log_{10} f_{c1} - 20 \cdot \log_{10} \left[\ln \left(\frac{4 \cdot f}{f_{c1}} \right) \right] - 13,2 \text{ [dB]} , f_{c1} < f < 0,5 f_{c2} \quad (5.22)$$

Acima de $2f_{c2}$:

$$R = 20 \cdot \log_{10} f + 10 \cdot \log_{10} m - 5 \cdot \log_{10} f_{c1} - 5 \cdot \log_{10} f_{c2} - 23 \text{ [dB]} \quad (5.23)$$

Entre $0,5f_{c2}$ e $2f_{c2}$ a redução sonora é dada por uma linha reta que que estes pontos.

No caso particular de painéis pequenos a redução sonora abaixo de $0,7f_{c1}$ é subestimada, o erro é cada vez maior à medida que a frequência é menor ou o painel é mais pequeno.

Esta metodologia é eficaz e apresenta resultados fiáveis, mas, como já referido, as expressões são na sua maioria as equações originais e tal inclui, como na metodologia anterior, as correções baseadas em dados de ensaios laboratoriais.

5.3.3. MÉTODO SEGUNDO A EN 12354-1

5.3.3.1. Modelo simplificado

Os métodos normalizados são essencialmente vocacionados para elementos homogêneos. Porém, podem apresentar resultados aceitáveis para casos correntes sem grandes erros (em geral não mais de 2 dB). [8]

O cálculo da redução sonora R'_w é resultado de uma média energética do índice de redução sonora relativo à transmissão direta (Dd) e do índice de redução sonora relativo aos caminhos marginais (Ff, Df e Fd), que usualmente são 4 (n=4) [18]:

$$R'_w = -10. \log_{10} \left(10^{\frac{-R_{Dd,w}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{\frac{-R_{Ff,w}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{\frac{-R_{Df,w}}{10}} \sum_{F=1}^n 10^{\frac{-R_{Fd,w}}{10}} \right) \quad (5.24)$$

$$R_{Ff,w} = \frac{R_{F,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + 10. \log_{10} \left(\frac{S_s}{l} \right) \quad (5.25)$$

$$R_{Fd,w} = \frac{R_{F,w} + R_{d,w}}{2} + \Delta R_{Fd,w} + K_{Fd} + 10. \log_{10} \left(\frac{S_s}{l} \right) \quad (5.26)$$

$$R_{Df,w} = \frac{R_{D,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Df,w} + K_{Df} + 10. \log_{10} \left(\frac{S_s}{l} \right) \quad (5.27)$$

Após o cálculo das reduções sonoras, o isolamento sonoro é dado pela expressão:

$$D_{nT,w} = R'_w + 10. \log \frac{0,16.V}{S_s.T_0} = R'_w + 10. \log \frac{0,32.V}{S_s} \quad (5.28)$$

5.3.3.2. Modelo detalhado

No método detalhado o cálculo é mais complexo e rigoroso, com mais dados a quantificar. O cálculo das reduções sonoras é feito com base nos coeficientes de transmissão sonora (σ) de cada caminho de transmissão. [18]

$$R_{lab} = -10. \log \sigma' \quad (5.29)$$

$$\sigma' = \sigma_d + \sum \sigma_f + \sum \sigma_e + \sum \sigma_s \quad (5.30)$$

$$\sigma_{ij} = 10^{-R_{ij}/10} \quad (5.31)$$

$$\sigma_{Dd} = 10^{-R_{Dd}/10} \quad (5.32)$$

$$\sigma_d = \sigma_{Dd} + \sum \sigma_{Fd} \quad (5.33)$$

$$\sigma_f = \sigma_{Df} + \sum \sigma_{Ff} \quad (5.34)$$

$$R_{situ} = R_{lab} - 10. \log \frac{T_{Rsitu}}{T_{Rlab}} \quad (5.35)$$

A redução sonora das transmissões marginais R_{ij} , sendo $ij=Ff, Fd$ e Df (caminhos de transmissão marginal), é calculado pela seguinte expressão (ver Fig. 2.2. como auxílio de compreensão dos caminhos de transmissão):

$$R_{ij} = \frac{R_{i,situ}}{2} + \Delta R_{i,situ} + \frac{R_{j,situ}}{2} + \Delta R_{j,situ} + \overline{D_{v,ij,situ}} + 10. \log \frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} \quad [\text{dB}] \quad (5.36)$$

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = k_{ij} - 10 \cdot \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_{i,situ} \cdot a_{j,situ}}} \text{ dB}; \overline{D_{v,ij,situ}} \geq 0 \text{ [dB]} \quad (5.37)$$

Com,

$$a_{i,situ} = \frac{2,2 \cdot \pi^2 \cdot S_i}{c_o \cdot T_{s,i,situ}} \cdot \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \quad (5.38)$$

$$a_{j,situ} = \frac{2,2 \cdot \pi^2 \cdot S_j}{c_o \cdot T_{s,j,situ}} \cdot \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \quad (5.39)$$

$$k_{ij,min} = 10 \cdot \log \left[l_{ij} \cdot l_o \cdot \left(\frac{1}{S_i} + \frac{1}{S_j} \right) \right] \text{ [dB]} \quad (5.40)$$

A redução sonora da transmissão pelo elemento de separação, a transmissão direta, é igual a:

$$R_{Da} = R_{s,situ} + \Delta R_{D,situ} + \Delta R_{d,situ} \text{ [dB]} \quad (5.41)$$

Após o cálculo das reduções sonoras pelos vários caminhos de transmissão, o isolamento sonoro é dado pela expressão seguinte, em que R' é dado pela expressão 5.24, mas usando as reduções sonoras calculadas neste modelo detalhado.

$$D_{nT} = R' + 10 \cdot \log \frac{0,16 \cdot V}{S_s \cdot T_0} = R' + 10 \cdot \log \frac{0,32 \cdot V}{S_s} \text{ [dB]} \quad (5.42)$$

5.3.4. MÉTODO SEGUNDO A EN 12354-2

5.3.4.1. Modelo simplificado

O modelo simplificado consiste no cálculo do índice de pressão sonora $L'_{n,w}$. Os valores K, relativos ao efeito das transmissões marginais, são retirados de uma tabela presente na norma (tabela 1 da norma EN12354-2) [44]:

$$L'_{n,w} = L_{n,w,eq} - \Delta L_w + K \text{ [dB]} \quad (5.43)$$

$$L_{n,w,eq} = 164 - 35 \cdot \log_{10} \frac{m}{\frac{1kg}{m^2}} \text{ [dB]} \quad (5.44)$$

5.3.4.2. Modelo detalhado

O modelo detalhado normalizado de caracterização sonora a sons de percussão, tal como para transmissão por via aérea, baseia-se no método de Gerretsen, Cremer e no método SEA, portanto segue cálculos semelhantes, mas para níveis de pressão sonora.

$$L_{n,situ} = L_n - 10 \cdot \log \frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}} \text{ [dB]} \quad (5.45)$$

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = K_{ij} - 10 \cdot \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_{i,situ} \cdot a_{j,situ}}} \text{ [dB]}; \overline{D_{v,ij,situ}} \geq 0 \text{ [dB]} \quad (5.46)$$

Com,

$$a_{i,situ} = \frac{2,2 \cdot \pi^2 \cdot S_i}{c_o \cdot T_{s,i,situ}} \cdot \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \quad (5.47)$$

$$a_{j,situ} = \frac{2,2 \cdot \pi^2 \cdot S_j}{c_o \cdot T_{s,j,situ}} \cdot \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \quad (5.48)$$

$$K_{ij.min} = 10. \log \left[l_{ij} \cdot l_o \cdot \left(\frac{1}{s_i} + \frac{1}{s_j} \right) \right] \text{ [dB]} \quad (5.49)$$

O nível de pressão sonora de cada caminho de transmissão é dado pela expressão:

$$L_{n,ij} = L_{n,situ} - \Delta L_{situ} + \frac{R_{i,situ} - R_{j,situ}}{2} - \Delta R_{j,situ} - \overline{D_{v,ij,situ}} - 10. \log \sqrt{\frac{s_i}{s_j}} \text{ [dB]} \quad (5.50)$$

6

CARACTERIZAÇÃO DA TRANSMISSÃO SONORA POR ENSAIOS ACÚSTICOS

6.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivos a apresentação dos procedimentos e condições para a realização de ensaios de isolamento sonoro de sons de condução aérea e de percussão de pavimentos em laboratório, segundo as respectivas normas em vigor, a descrição do plano dos ensaios, materiais utilizados, procedimento de ensaio, processo de tratamento dos dados e obtenção de resultados

6.2. PROCEDIMENTOS E CONDIÇÕES

Os ensaios laboratoriais para medição do isolamento sonoro obedecem à norma europeia ISO10140. Esta norma contém 5 partes, desde a ISO 10140-1 à ISO 10140-5. Cada parte descreve o procedimento dos ensaios a sons aéreos, a sons de percussão, as dimensões regulamentares dos compartimentos e outros:

- ISO 10140-1: indica o procedimento de teste dos elementos e produtos. Para certo tipo de elemento/produto pode conter instruções adicionais ou mais específicas sobre quantidade e dimensões do elemento e sobre a preparação, montagem e condições de execução;
- ISO 10140-2: apresenta um procedimento completo para a medição do isolamento sonoro a sons aéreos de acordo com a ISO 10140-4 e ISO 10140-5. Para produtos sem regras de aplicação específica, é suficientemente completo para a execução da medição. Contudo, para produtos com regras de aplicação específica, as medições são de acordo com a ISO 10140-1, se existir;
- ISO 10140-3: apresenta um procedimento completo para a medição do isolamento sonoro a sons de percussão de acordo com a ISO 10140-4 e ISO 10140-5. Para produtos sem regras de aplicação específica, é suficientemente completo para a execução da medição. Contudo, para produtos com regras de aplicação específica, as medições são de acordo com a ISO 10140-1, se existir;
- ISO 10140-4: retrata todas as técnicas básicas e processos de medição de acordo com a ISO 10140-2 e a ISO 1040-3 ou qualificações de instalações de acordo com a ISO 10140-5. Muito do conteúdo está implementado em *softwares*;
- ISO 10140-5: especifica toda a informação necessária para a projeção, construção e qualificação de um laboratório, e seus acessórios e equipamentos de medição adicionais.

De um modo sucinto, as condições e os respetivos procedimentos de ensaio são:

- volume das salas têm de ser no mínimo de 50 m³;
- o tempo de reverberação não deve de ser nem muito curto nem muito longo. Quando o tempo de reverberação na frequência de 100Hz, e acima desta, excede os 2s ou é menor que 1s, verifica-se se o índice de redução sonora é dependente do tempo de reverberação. Quando há esta dependência, mesmo com difusores na sala de ensaio, a sala deve de ser ajustada tal que:

$$1 \leq T \leq 2 \cdot \left(\frac{V}{50}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (6.1)$$

O processo de medição do tempo de reverberação está descrito na ISO 10140-4.

- o pavimento a ser ensaiado deve de ter entre 10 a 20 m²;
- a distância entre a posição do microfone e os limites do compartimento, difusores e outras posições do microfone deve de ser maior que 0,7m;
- a distância entre a posição do microfone e o elemento a ser ensaiado e a fonte sonora deve de ser maior que 1m;
- para cada posição de microfone, o tempo de medição deve de ser no mínimo 6s para cada banda de frequências do intervalo dos 100Hz aos 400Hz. Para bandas de frequências mais altas, este tempo pode menor, no mínimo 4s;
- o cálculo do nível de pressão médio é uma média energética que resulta na equação:

$$L = 10 \cdot \log \frac{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2}{n \cdot p_0^2} \quad (6.2)$$

$$L = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_j}{10}} \right) \quad (6.3)$$

n: diferentes posições no compartimento

L₁, L₂, ..., L_n: níveis de pressão sonora nas n posições do compartimento

- o ruído de fundo deve de ser o mínimo possível que permita medições do som transmitido no compartimento emissor. O nível de pressão sonora do ruído de fundo deve de ser no mínimo 6dB (e preferivelmente maior que 15dB) menor que o nível da fonte e do ruído de fundo combinado com cada banda de frequências. Se a diferença entre níveis for menor que 15dB e maior que 6dB, a correção devido ao ruído de fundo para o nível de pressão sonora da fonte é:

$$L = 10 \cdot \log(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10}) \quad (6.4)$$

L: nível da fonte ajustado, em dB

L_b: nível do ruído de fundo, em dB

L_{sb}: nível do ruído de fundo combinado com a fonte, em dB

Na medição do isolamento sonoro a sons de condução aérea, utilizando mais que uma fonte sonora, o número mínimo de medições (posições do microfone) é 5 em cada compartimento. Com apenas uma fonte sonora, deve de haver no mínimo 5 posições do microfone para cada posição da fonte. O cálculo da redução sonora é dado pela expressão:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log \frac{S}{A} \quad (6.5)$$

L_1 : nível de pressão sonora médio no compartimento emissor, em dB

L_2 : nível de pressão sonora médio no compartimento recetor, em dB

R: redução sonora, em dB

S: área do elemento a ser ensaiado, neste caso o pavimento, em m^2

A: absorção sonora equivalente no compartimento recetor, em m^2

Na medição do isolamento sonoro a sons de percussão, o número de posições de microfone deve de ser igual ao número de posições da máquina de percussão ou múltiplos inteiros do número de posições da máquina de percussão. O mesmo número de posições de microfone deve ser usado para cada máquina de percussão.

$$L_{nT} = L_i + 10 \cdot \log \frac{T}{T_0} \quad (6.6)$$

$$L_{nT,oitava} = 10 \cdot \log \left(\sum_{j=1}^3 10^{\frac{L_{nT, \frac{1}{3} de oitava}}{10}} \right) \quad (6.7)$$

$$\Delta L = L_{n,w}(sem revestimento) - L_{n,w}(com revestimento) \quad (6.8.)$$

L_{nT} : nível de pressão sonora a sons de percussão (dB)

L_i : nível de pressão sonora medido na câmara recetora (dB)

$L_{n,w}$: índice de isolamento sonoro a sons de percussão (dB)

ΔL : eficácia de um revestimento (dB)

T: tempo de reverberação (s)

$T_0=0,5s$

6.3. PROCEDIMENTO E PLANO DE ENSAIOS

6.3.1. PLANO DE ENSAIOS

Os ensaios laboratoriais às várias soluções de pavimentos foram realizados na câmara E2 e R1 do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Estes ensaios foram realizados em série com os ensaios para a dissertação de Artur Sousa. No plano de ensaios é apresentada a ordem segundo a qual foram montadas e ensaiadas as soluções. Estes ensaios contaram com a participação do autor, Artur Sousa e do Engenheiro Eduardo António Costa.

A montagem/desmontagem das soluções e os respetivos ensaios ocorreram entre os dias 13-05-2016 e 27-05-2016 e tiveram a seguinte sequência, presente no plano de ensaios:

Tabela 6.1. – Plano de ensaios de determinação do isolamento sonoro a sons de condução aérea e de percussão

Dia	Nome da solução	Descrição da solução
16/5	E1*	Soalho + camada resiliente (Aglomex 90FR) + Viroc + Viga
16/5	E2*	Soalho + geotêxtil + Viroc+ Viga
16/5	E3*	Soalho + camada resiliente (Aglomex 90FR) + Viroc + apoio resiliente (Aglomex 200FR) + Viga
17/5	E5*	Soalho + apoio resiliente (Aglomex 90FR) + Viga
17/5	E4	Soalho + camada resiliente (Aglomex 90FR) + Viroc + apoio resiliente (borracha) + Viga
17/5	E6*	Soalho + apoio resiliente (borracha) + Viga
18/5	E7*	Soalho + viga
23/5	E8	Soalho + viga + teto (fasquiado + estuque)
23/5	E9	Soalho + viga + lã de rocha + teto
23/5	E10	Soalho + apoio resiliente (Aglomex 200FR) + lã de rocha +viga + teto
24/5	E11	Soalho + camada resiliente (Aglomex 90FR) + Viroc+ apoio resiliente (Aglomex 200FR) + lã de rocha +viga + teto
--	E12	Soalho + geotêxtil+ Viroc+ apoio resiliente (Aglomex 200FR) + lã de rocha +viga + teto
25/5	E13	Soalho + apoio resiliente (borracha) + lã de rocha +viga + teto
24/5	E14	Soalho + camada resiliente (Aglomex 90FR) + Viroc + lã de rocha + viga + teto
25/5	E15	Soalho + geotêxtil + Viroc + lã de rocha + viga + teto

*ensaios de isolamento aéreo realizados com a fonte inclinada apoiada diretamente sobre a amostra

Das 15 soluções ensaiadas, as relacionadas com este trabalho são: E1 (solução 1), E2 (solução 2), E3 (solução 3), E4, E7 (solução existente sem teto), E8 (solução existente com teto), E11 (solução 4), E12 (solução 5), E14 e E15 (solução 6), ou seja, as soluções com os painéis compósitos de madeira e cimento Viroc (solução 1 a 6) e as que representam as soluções existentes (E7 e E8). A solução E4, apesar de ter sido construída e ensaiada, não está presente neste trabalho devido a um erro técnico na transmissão de dados. Consequentemente, não se realizou a solução E12 por não haver pavimento de comparação. As soluções não apresentadas neste trabalho estão relacionadas com a dissertação de Artur Sousa.

6.3.2. MATERIAIS

O material resiliente indicado como “Aglomex” utilizado como camada resiliente, nas dimensões originais, e como apoio resiliente sobre as vigas, com as dimensões: 0,8m x 3,45m (e=0,5cm), foi cedido pela Flex2000 e tem as propriedades descritas na Tabela 8.2. O material denominado no plano de ensaios

como “borracha” corresponde ao material do subpavimento reciclado à base de borracha T22 da empresa Amorim [47] e é utilizado, nos ensaios, como apoio resiliente, com as dimensões 0,8m x 0,2m e uma espessura de 0,3cm. A argamassa utilizada tem 12 a 13 kg/m², para uma espessura de 1cm.

Tabela 6.2. Características dos materiais

Material	Densidade	Dimensões
Aglomex 90 FR	90 kg/m ³	2m x 1m (e=5mm)
Aglomex 200 FR	200 kg/m ³	2m x 1m (e=5mm)
Borracha	650-750 kg/m ³	e=3mm
Geotêxtil	50 kg/m ³	e=3mm
Lã de rocha	60 kg/m ³	e=7cm

Os painéis compósitos de madeira e cimento são painéis Viroc cedidos pela Viroc Portugal, S.A. e representam o principal material de ensaio neste trabalho. A Tabela 6.3. contém algumas das propriedades presentes no dossier técnico [27] já apresentado no capítulo 3.

Tabela 6.3. – Características dos painéis Viroc

Material	Densidade	Módulo de Young	Dimensões do painel
Viroc	1350 kg/m ³	4,5 GPa	2,6m x 1,5m

Os restantes materiais utilizados, típicos das casas existentes do Porto burguês, têm as propriedades descritas na Tabela 6.4.

Tabela 6.4. – Características dos materiais em madeira

Madeira de pinho	Densidade	Módulo de Young	Dimensões
Viga	490 kg/m ³	5 GPa	0,8m x 3,45m (e=0,11m)
Fasquio	490 kg/m ³	5 GPa	(e=3cm)
Soalho	490 kg/m ³	5 GPa	(e=3cm)
Tabuado	490 kg/m ³	5 GPa	(e=1cm)

6.3.3. MONTAGEM E DESMONTAGEM

As vigas, de menor dimensão que o encontrado na realidade por uma questão económica, são os primeiros elementos a colocar na câmara de ensaio, dispostas paralelamente na dimensão mais pequena da bordadura da câmara (3,45m), espaçadas de 50cm e coladas nas extremidades em contacto com a gola. Todos os restantes elementos são aparafusados ou colados. O facto de ser aparafusado é com o objetivo de ser mais fácil a desmontagem e se utilizar na seguinte solução a ensaiar. Os únicos elementos que são colados são os apoios resilientes que são dispostos sobre as vigas.

Montagem do Pavimento E1:

		
Disposição das vigas espaçadas de 50cm entre si	Colagem das vigas nas extremidades.	Colocação dos painéis Viroc, aparafusados às vigas.
		
Colocação das mantas Aglomex 90FR.	Fixação do soalho com parafusos.	



Montagem do pavimento E2:

		
Desmontagem do soalho e remoção das mantas Aglomex 90FR.	Colocação das mantas de geotêxtil.	Fixação do soalho por parafusos

Montagem do pavimento E3:

		
Colagem de tiras de Aglomex 200FR às vigas.	Colocação dos painéis Viroc, aparafusados às vigas.	Fixação do soalho por parafusos.

Montagem do pavimento E7:

	
<p>Remoção do soalho e apoio resiliente de borracha do pavimento ensaiado anteriormente, solução E6.</p>	<p>Soalho aparafusado diretamente nas vigas.</p>

Montagem do pavimento E8:

		
<p>Remoção de parte do soalho e fixação de tábuas a fim de aumentar dimensão da caixa de ar para 20cm.</p>	<p>Fixação do tabuado e do fasquiado.</p>	<p>Fixação da cofragem para colocação do revestimento pela parte superior.</p>
		
<p>Revestimento visto da parte superior do pavimento.</p>	<p>Revestimento visto da parte inferior do pavimento.</p>	<p>Fixação do soalho por parafusos.</p>

Montagem do pavimento E11:

		
Colocação de lã de rocha na caixa de ar.		Colagem de tiras de Aglomex 200Fr às vigas.

		
Colocação dos painéis Viroc, aparafusados às vigas.	Colocação das mantas de Aglomex 90FR sobre os painéis Viroc.	Fixação do soalho por parafusos.

Montagem do pavimento E14:

		
Desmontagem do soalho, remoção das mantas Aglomex 90FR, dos painéis Viroc e das tiras de Aglomex 200FR.	Colocação dos painéis Viroc sobre as vigas.	Colocação das mantas de Aglomex 90FR sobre o Viroc e Fixação do soalho por parafusos

Montagem do pavimento E15:

		
Desmontagem do soalho, remoção das mantas Aglomex 90FR.	Colocação das mantas de geotêxtil sobre os painéis Viroc.	Fixação do soalho.

6.3.4. ENSAIOS

Os ensaios foram realizados nas câmaras E2 e R1 do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. A câmara E2 corresponde à câmara emissora, a câmara onde está a fonte sonora ou máquina de percussão, e a câmara R1 é a câmara recetora com 211m³ de volume.

Nos ensaios a sons de condução aérea foi utilizada uma fonte sonora em duas posições (ver Fig.6.1) e em cada posição da fonte, na câmara recetora e emissora, foram feitas cinco medições com o sonómetro, como esquematiza a Fig.6. 3. Estes ensaios obedecem às normas referidas no capítulo 6.2.

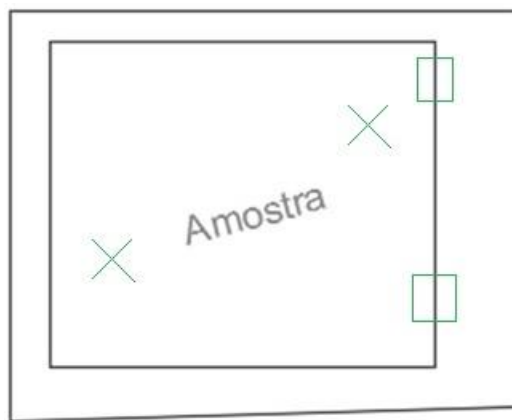


Fig.6.1. – Esquema das posições da fonte sonora (retângulos) e da máquina de percussão (cruzes) na câmara emissora



Fig.6.2. – Fotografia do sonómetro utilizado nos ensaios

Nos ensaios a sons de percussão foram feitos dois tipos de ensaios: ensaios com a máquina de percussão diretamente sobre as diferentes soluções de pavimentos e ensaios com a máquina de percussão sobre um tapete feito de geotêxtil que estava sobre as diferentes soluções de pavimentos. Ou seja, para cada solução de pavimento faz-se dois ensaios de percussão: um sem tapete e um com tapete sob a máquina de percussão.

Nestes ensaios, com uma máquina de percussão em duas posições (Fig.6.1.) e, para cada uma destas duas posições, cinco medições com o sonómetro na câmara recetora, como esquematiza a Fig.6.3. Estes ensaios obedecem às normas referidas no capítulo 6.2.

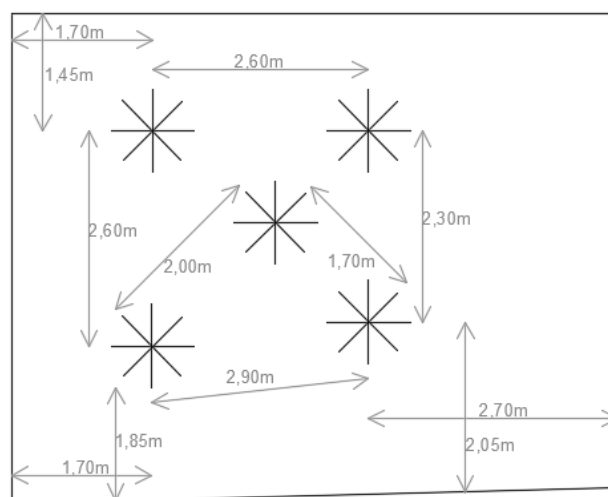


Fig.6.3. – Esquema das posições de medição na câmara recetora

Para cada solução, além do ensaio a sons de condução aérea e dos dois ensaios a sons de percussão, para as mesmas cinco posições esquematizadas na Fig.6.3. é medido o tempo de reverberação e, para apenas uma posição, o ruído de fundo.

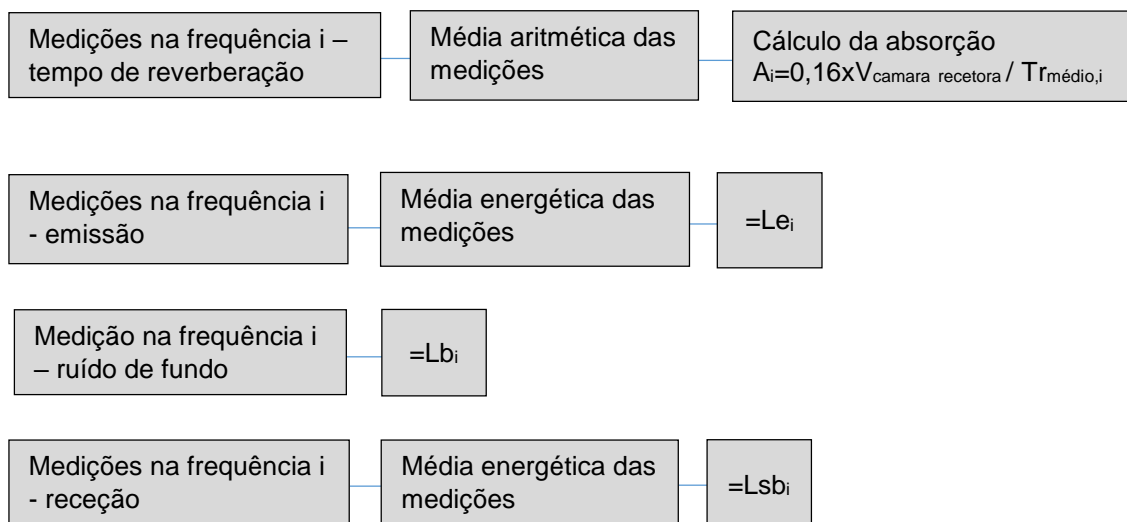
6.4. TRATAMENTO DE DADOS

6.4.1. ENSAIOS DE ISOLAMENTO A SONS DE CONDUÇÃO AÉREA

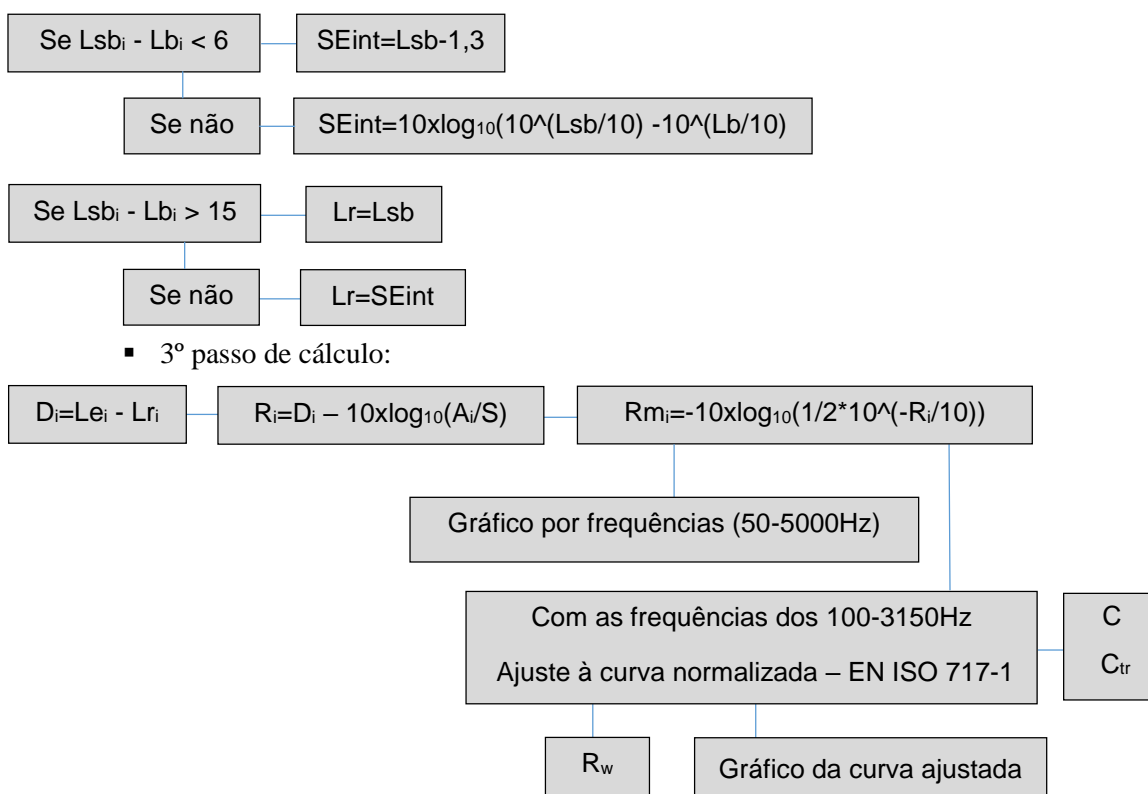
Utilizando um intervalo de frequências dos 50 aos 5000Hz, os resultados das dez medições feitas na câmara recetora, das dez medições feitas na câmara emissora, das seis medições de tempo de reverberação e da medição de ruído de fundo submetem-se numa folha de cálculo Excel elaborada pelo autor, e desta folha resultam: o gráfico da redução sonora por frequência (50-5000Hz), a curva ajustada (100-3150Hz) e o índice R_w com os fatores de correção C e C_{tr} (100-3150Hz), estes três últimos seguindo a norma NP ISO 717-1.

Os passos de cálculo definidos na folha Excel são, de uma forma simplificada:

- 1º passo de cálculo:



▪ 2º passo de cálculo:



Após o tratamento dos dados, os resultados foram submetidos em boletins laboratoriais, cuja formatação está conforme a norma ISO 10140-2, e que estão presentes no Anexo A.

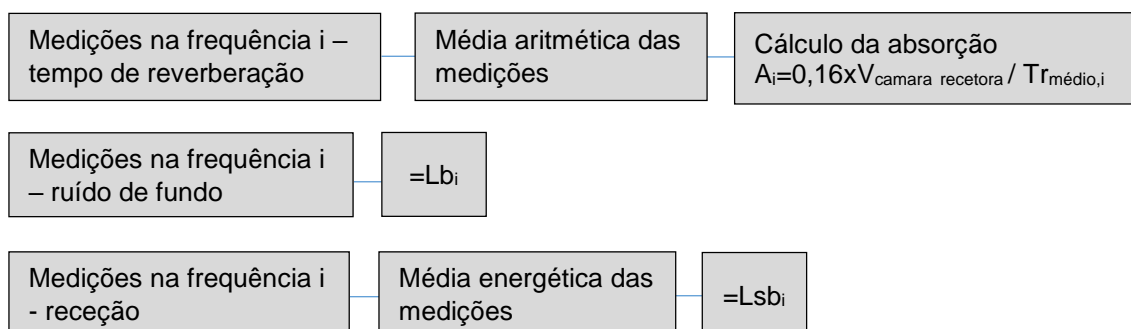
Os índices D_{nT} e $D_{nT,w}$ poderão ser obtidos aplicando a metodologia apresentada no capítulo 5.3.3.

6.4.2. ENSAIOS DE ISOLAMENTO A SONS DE PERCUSSÃO

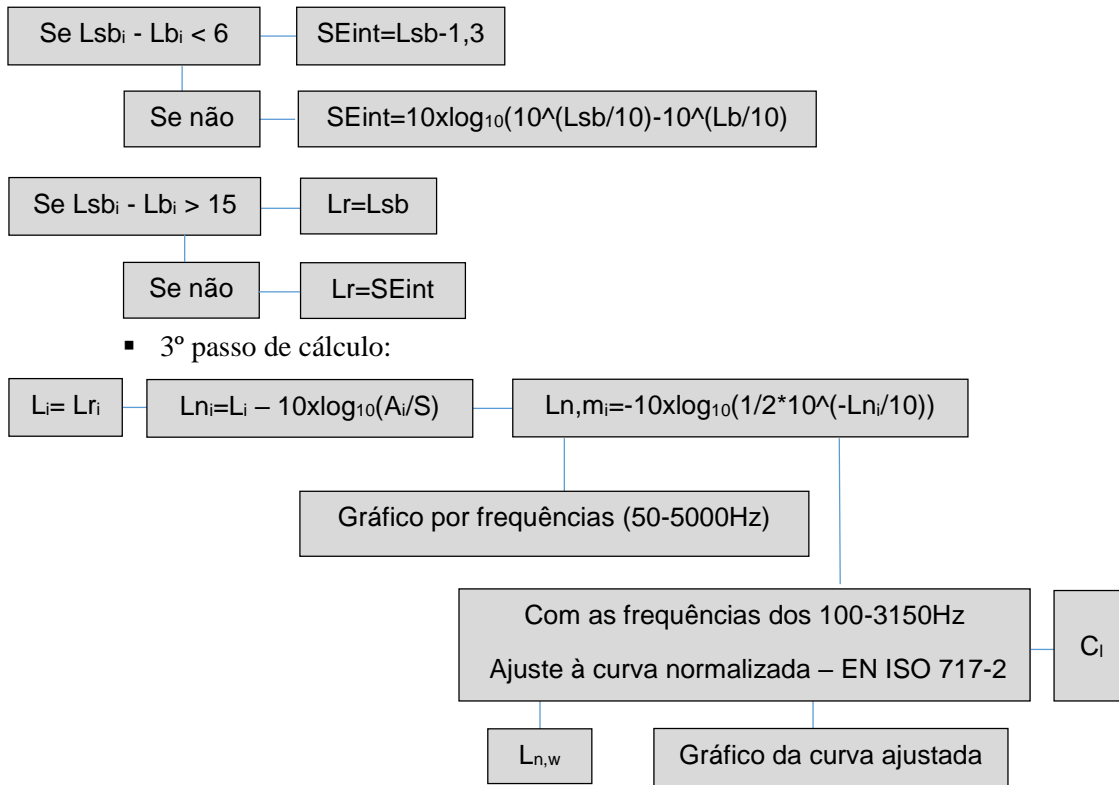
Dos ensaios de percussão com e sem tapete sob a máquina de percussão, utilizando um intervalo de frequências dos 50 aos 5000Hz, obteve-se resultados das dez medições feitas na câmara recetora, das cinco medições de tempo de reverberação e da medição de ruído de fundo e submetem-se numa folha de cálculo Excel elaborada pelo autor, e desta folha resultam: o gráfico da redução sonora por frequência (50-5000Hz), a curva ajustada (100-3150Hz) e o índice $L_{n,w}$ com os fatores de correção C_1 (100-3150Hz), estes três últimos seguindo a norma NP ISO 717-2.

Os passos de cálculo definidos na folha Excel são, de uma forma simplificada:

▪ 1º passo de cálculo:



▪ 2º passo de cálculo:



Após o tratamento dos dados, os resultados foram submetidos em boletins laboratoriais, cuja formatação está conforme a norma ISO 10140-3, e que estão presentes no Anexo A.

A obtenção de índices de isolamento a sons de percussão que contabilizam as transmissões marginais via modelo teórico, pode ser feita com a aplicação da metodologia apresentada no capítulo 5.3.4.

7

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DAS SOLUÇÕES EXISTENTES

7.1. INTRODUÇÃO

A reabilitação acústica da casa clássica do Porto burguês envolve conhecer as soluções existentes e quais as mais aptas para este tipo de intervenção. Como o objetivo é a reabilitação com base na introdução de painéis compósitos de madeira e cimento, as soluções que fazem a separação entre locais contíguos ou separam o interior do exterior são as soluções onde se pretende que o isolamento sonoro aconteça com o melhor desempenho possível. As soluções que fazem estes tipos de separação são as paredes exteriores, paredes de meação, coberturas, paredes interiores e pavimentos. No entanto, as paredes exteriores e de meação contêm elementos que interrompem o desenvolvimento destas soluções construtivas, como envidraçados, varandas, portas, que dificultam a reabilitação que se pretende realizar. Portanto, os pavimentos, paredes interiores divisórias e as coberturas típicas do Porto burguês são as soluções alvo de reabilitação acústica à base de painéis compósitos de madeira e cimento.

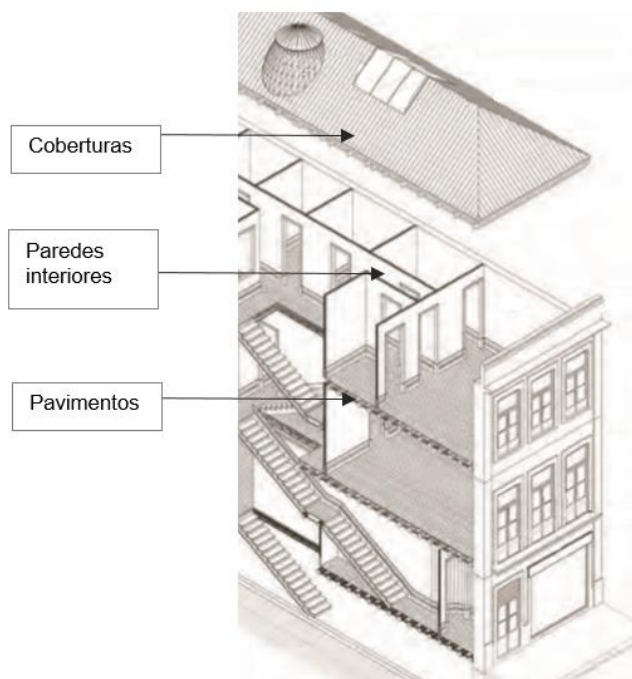


Fig.7.1. – Soluções construtivas a estudar na casa clássica do Porto burguês (adaptado de [8])

Antes de se apresentar e caracterizar as soluções acusticamente reabilitadas é necessário proceder à caracterização acústica das soluções existentes. A caracterização acústica das soluções existentes do Porto burguês consiste numa breve descrição das soluções construtivas mais comuns, com dimensões escolhidas entre o intervalo de valores de dimensões utilizadas neste tipo de construção - para descrição mais detalhada ver capítulo 4 e Teixeira (2004). As propriedades dos materiais, como a densidade, módulo de elasticidade e fator de perdas, para a aplicação do modelo teórico são quantificadas com base no livro “*Noise Engineering Control*” [43] ou em valores médios de especificações técnicas de materiais de construção disponíveis para consulta. Após a apresentação destes dados procede-se assim à caracterização acústica das soluções existentes com recurso aos resultados laboratoriais (pavimentos) ou com recurso à metodologias teóricas de previsão escolhida no capítulo 5.3 (pavimentos, paredes interiores e coberturas).

7.2. PAVIMENTOS

Na casa clássica do Porto burguês é possível encontrar duas tipologias de pavimentos separativos de diferentes compartimentos: com teto e sem teto. Este pavimento tem a seguinte composição:

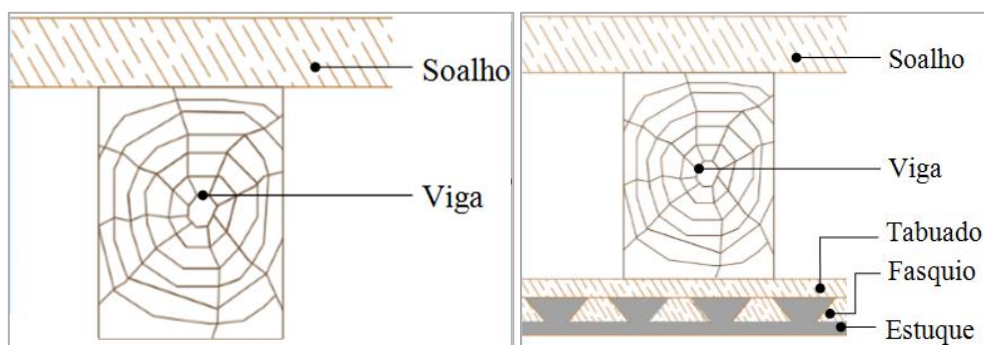


Fig.7.2. – Pavimento existente sem teto e com teto



Fig.7.3. – Esquema de pavimento existente sem teto em 3D



Fig.7.4. – Esquema de pavimento existente com teto em 3D

As dimensões que se utilizou para cada elemento foram:

- soalho (madeira): $e=3\text{cm}$;
- viga (madeira): $e=11\text{cm}$, largura= 8cm , comprimento= $3,45\text{m}$ e espaçados de 50cm ;
- tabuado (madeira): $e=2\text{cm}$;
- fasquiado (madeira): $e=2\text{cm}$;
- estuque(gesso): $e=1\text{cm}$.

A caracterização das soluções existentes de pavimentos foi realizada recorrendo a ensaios laboratoriais, onde as propriedades dos materiais utilizados e os procedimentos e condições dos ensaios estão descritos no capítulo 6.

Os valores da redução sonora do pavimento existente sem teto e com teto para o intervalo de frequências dos 50 aos 5000Hz estão representados no gráfico da Fig.7.5. Com o devido ajuste à curva de referência (ver capítulo 2.1.1) o valor do índice de redução sonora R_w do pavimento existente sem teto é 22dB e o valor R_w do pavimento existente com teto é 49dB.

Tabela 7.1. – Valores da redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução sem teto

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	R_w (dB)	C	C_{tr}
R (dB)	11	12	13	19	23	24	21	22	0	-2

Tabela 7.2. – Valores da redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução com teto

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	R_w (dB)	C	C_{tr}
R (dB)	24	28	39	46	51	51	54	49	-2	-7

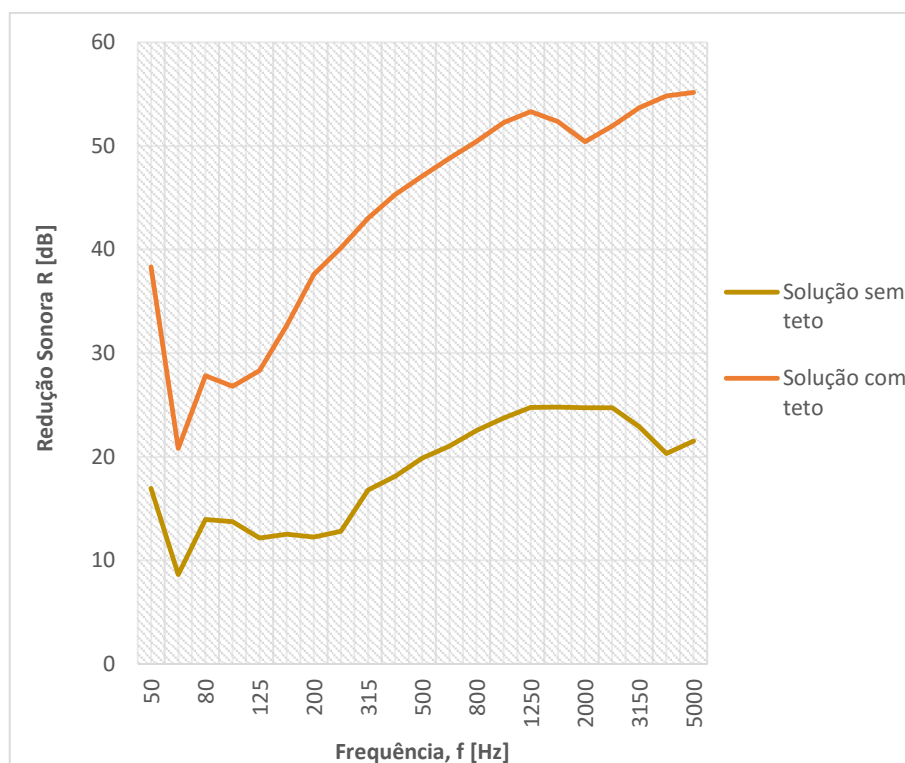


Fig.7.5. – Espectros da redução sonora do pavimento existente sem teto e com teto em bandas de 1/3 de oitava

Nos ensaios de isolamento a sons de percussão, foram ensaiadas as soluções de pavimentos sem e com teto. A fim de determinar a influência e a eficácia que um tapete teria no isolamento a sons de percussão das soluções de pavimentos existentes, ensaiou-se ainda as mesmas soluções com e sem a presença de um tapete de geotêxtil.

Os valores de pressão sonora (L) por bandas de 1/3 de oitava que se obteve para o pavimento sem teto são os presentes nos gráficos da Fig.7.6. Com o devido ajuste à curva de referência, presente na norma EN ISO 717-2, o índice de isolamento a sons de percussão $L_{n,w}$ resultante é 93dB para o pavimento existente sem teto e 78dB para o pavimento o mesmo pavimento com tapete (ver Tabela 7.3. e 7.4.). Portanto, a eficácia do tapete na solução existente de pavimentos sem teto é de 15dB.

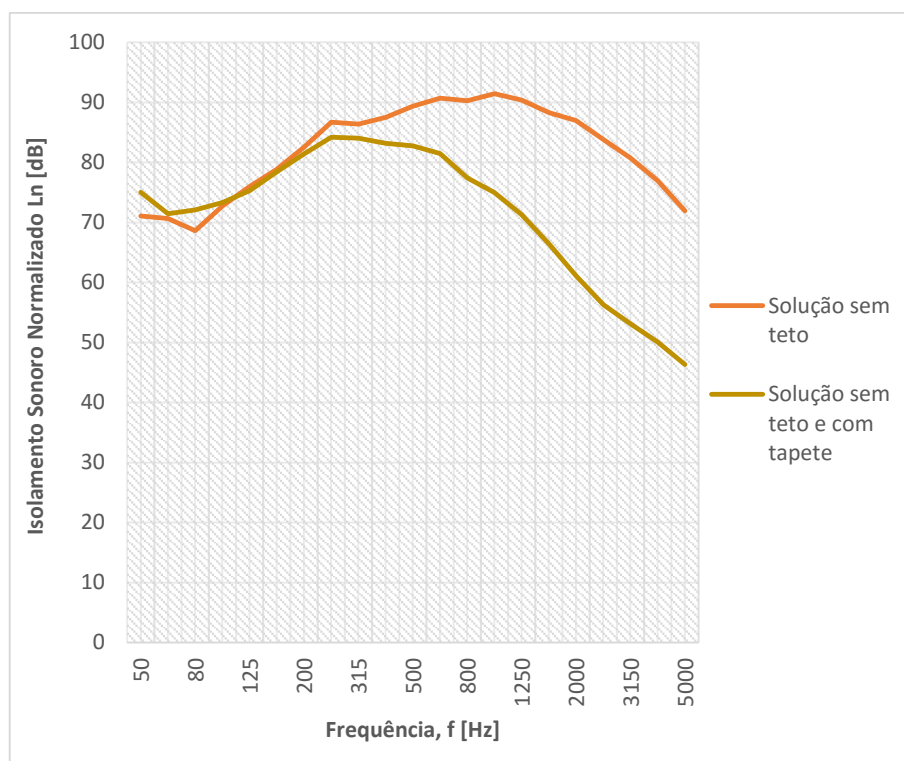


Fig.7.6. – Espectros da redução sonora do pavimento existente sem teto, sem tapete e com tapete em bandas de 1/3 de oitava

Tabela 7.3. – Níveis de pressão sonora por bandas de oitava e $L_{n,w}$ da solução existente sem teto

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	$L_{n,w}$ (dB)	C_i
L (dB)	69	75	84	89	90	85	75	93	-8

Tabela 7.4. – Níveis de pressão sonora por bandas de oitava e $L_{n,w}$ da solução existente sem teto e com tapete sobre o soalho

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	$L_{n,w}$ (dB)	C_i
L (dB)	72	75	83	82	73	59	48	78	-1

A solução de pavimento existente com teto obteve nos ensaios de percussão sem e com tapete os níveis de pressão sonora apresentados na Fig.7.7. O pavimento tem um índice $L_{n,w}$ igual a 68dB e após a introdução do tapete o índice desceu para os 64dB (ver Tabela 7.5. e 7.6.). Nesta solução o tapete tem uma eficácia menor, uma eficácia de 4dB.

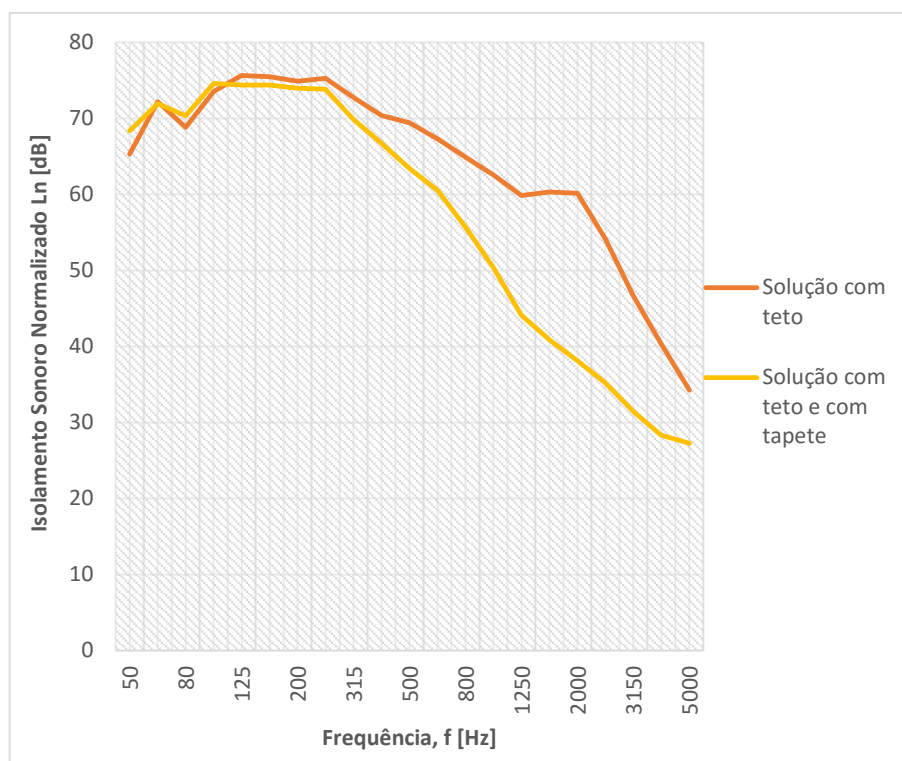


Fig.7.7. – Espectros da redução sonora do pavimento existente com teto sem tapete e com tapete

Tabela 7.5. – Níveis de pressão sonora por bandas de oitava e $L_{n,w}$ da solução existente com teto

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	$L_{n,w}$ (dB)	C_i
L (dB)	67	74	74	68	62	57	37	68	0

Tabela 7.6. – Níveis de pressão sonora por bandas de oitava e $L_{n,w}$ da solução existente com teto e com tapete sobre o soalho

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	$L_{n,w}$ (dB)	C_i
L (dB)	69	74	72	62	47	37	28	64	3

Dos ensaios de laboratoriais conclui-se que a solução de pavimento existente com teto é mais isolante a sons aéreos e de percussão do que a solução sem teto. No isolamento a sons aéreos a diferença é considerável, o pavimento com teto tem um índice de redução sonora com mais 22dB, evidenciando as vantagens no isolamento sonoro que a existência do teto acrescenta. No isolamento a sons de percussão observa-se uma diferença aproximadamente da mesma grandeza, o pavimento com teto tem um índice de isolamento a sons de percussão 25dB menor que o pavimento sem teto. Quando se aplica um tapete de geotêxtil, a eficácia deste tapete é significativamente maior no pavimento sem teto (15dB) em relação ao pavimento com teto (4dB).

Análise do comportamento acústico através de metodologia teórica:

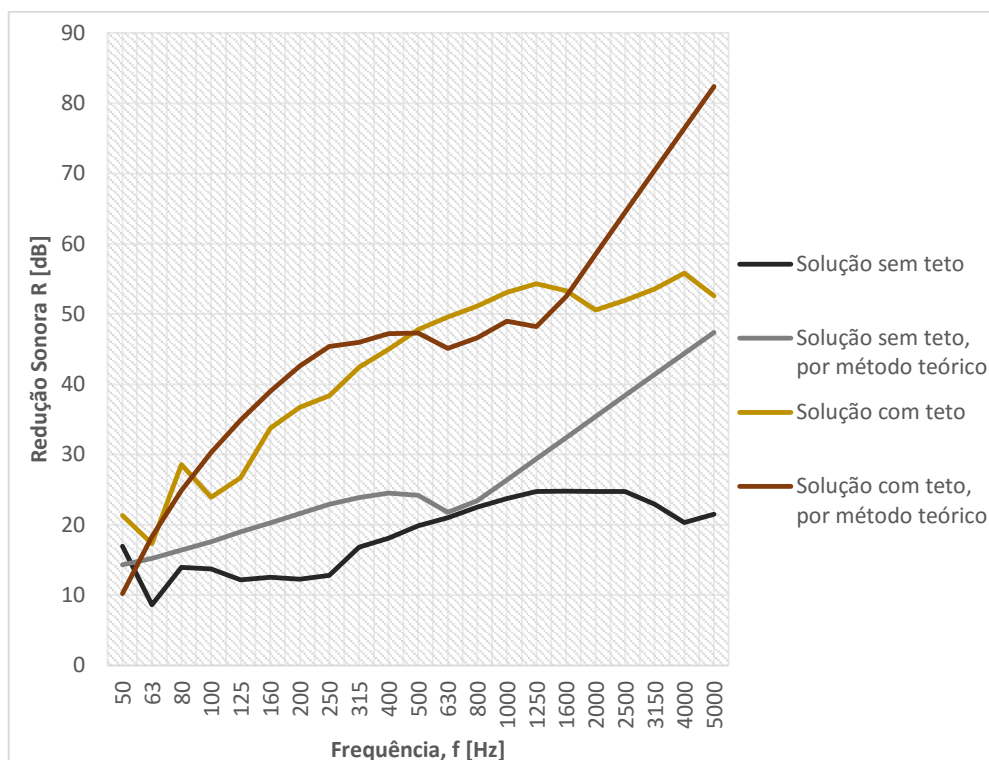


Fig.7.8. – Espectros da redução dos pavimentos sem teto e com teto resultantes dos ensaios em laboratório (“Solução sem teto” e “Solução com teto”) e resultante da aplicação do modelo teórico descrito em 5.3.1. (“Solução sem teto, por modelo teórico” e “Solução com teto, por modelo teórico”)

Através da metodologia teórica de previsão do comportamento acústico baseada em Sharp, Cremer e Fahy (ver capítulo 5.3.1.) caracterizou-se as soluções existentes de pavimentos e verifica-se uma diferença entre espectros significativa. Contudo, os índices de redução sonora R_w obtidos da aplicação da metodologia teórica são próximos dos índices R_w resultantes dos ensaios laboratoriais. No caso do pavimento existente sem teto, o índice obtido pelos resultados laboratoriais é 22dB e pelo modelo teórico é 28dB, 6dB de diferença. No caso do pavimento existente com teto, o índice obtido pelos resultados laboratoriais é 49dB e pelo modelo teórico é 50dB, 1dB de diferença.

Constata-se também que o espectro do pavimento com teto resultante do modelo teórico acompanha melhor a curva deste pavimento obtida pelos ensaios laboratoriais em comparação com o caso do pavimento sem teto. A causa mais provável está no facto de se aplicar a metodologia teórica e não se conseguir simular o caso real de uma forma eficiente, na realidade existem falhas no encaixe entre as ripas do soalho, na ligação entre amostra e câmara ou heterogeneidades na própria composição dos materiais.

Tabela 7.7. – Índices R_w e correções obtidos através do modelo teórico baseado em Sharp, Cremer e Fahy

E7 teórico	$R_w = 28\text{dB}$; C = -1	; $C_{tr} = -3$
E8 teórico	$R_w = 50\text{dB}$; C = -1	; $C_{tr} = -5$

7.3. PAREDES INTERIORES

A parede divisória típica do Porto burguês é uma parede simples composta por dois elementos principais: a estrutura de madeira, constituída pelo tabuado e fasquio, e estuque, aplicado em ambos os lados da parede, com as dimensões:

- estrutura de tabique(madeira): 9 cm (tabuado: $e=5\text{cm}$; fasquio: $e=2\text{cm}$);
- estuque (gesso): 1,5cm.

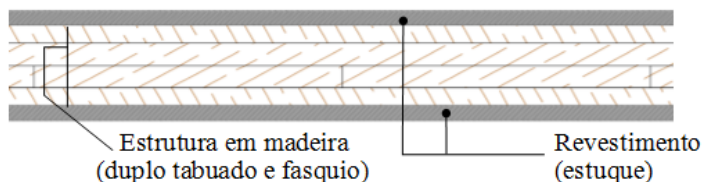


Fig.7.9. – Esquema da parede interior (corte horizontal)

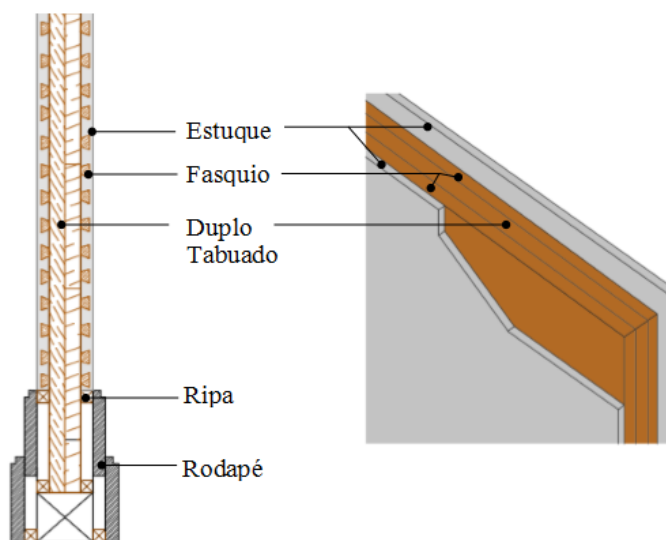


Fig.7.10. – Esquema de parede interior (corte transversal) e desenho 3D

A madeira de pinho é a madeira que mais se adequa à representação das paredes em tabique do Porto burguês, com 490 kg/m^3 de densidade (a densidade da madeira de pinho varia entre os $400\text{-}500 \text{ kg/m}^3$ na maioria dos casos), 5 GPa de módulo de elasticidade e um fator de perdas igual a $0,04$, que no livro de David A. Bies (2003) [43], para madeiras com aproximadamente as mesmas características e propriedades, é este o valor o definido.

Tabela 7.8. – Propriedades da madeira de pinho

Madeira de pinho	Densidade	Módulo de Young	Fator de perdas
	490 kg/m^3	5 GPa	$0,04$

No estuque em gesso, a densidade varia entre os 500 e os 900 kg/m³ (valores retirados do documento ITE 50 [45]). Para uma espessura de 1,5 cm foi escolhida uma densidade de 710 kg/m³ (massa superficial igual a 11 kg/m²), elevada por ser um estuque antigo, 2 GPa para o módulo de Young e 0,009 para o fator de perdas, que vai igualmente de encontro ao indicado no livro de David A. Bies (2003). [43]

Tabela 7.9. – Propriedades do revestimento em gesso

Revestimento em gesso	Densidade	Módulo de Young	Fator de perdas
	710 kg/m ³	2 GPa	0,009

Utilizando a metodologia baseada em Sharp, Cremer e Fahy (ver capítulo 5.3.1) para a caracterização da parede divisória típica do Porto burguês, a redução sonora para cada frequência na banda de 1/3 oitava (entre os 50 e 5000Hz) está representada no gráfico da Fig.7.11., e em bandas de oitava na Tabela 7.10. A frequência crítica está aproximadamente nos 1350 Hz e a redução sonora desta solução construtiva é maior nas altas frequências. O índice de redução sonora R_w desta solução existente de paredes interiores é 39dB.

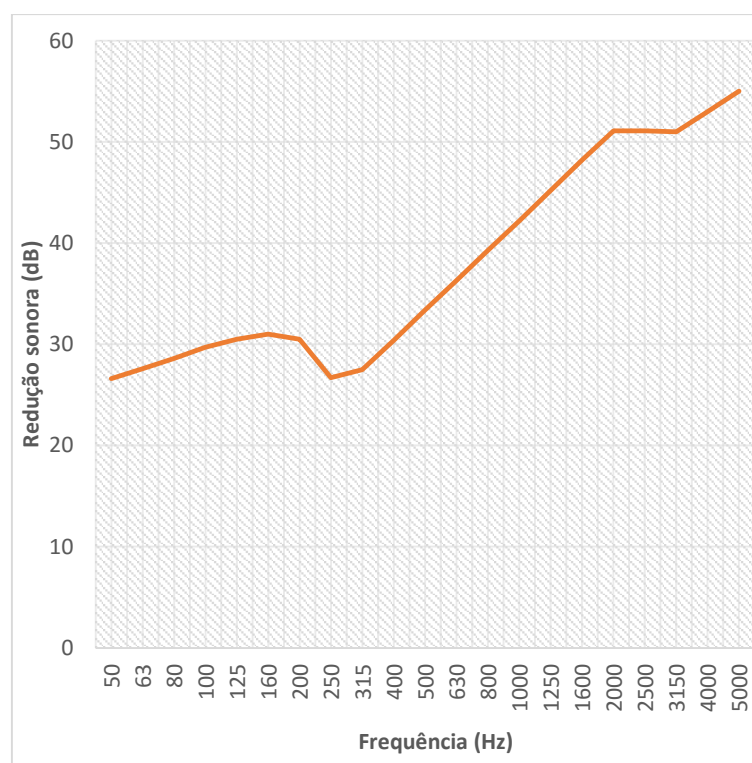


Fig.7.11. – Espetro da redução sonora da parede interior existente em bandas de 1/3 de oitava

Tabela 7.10. - Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da parede interior existente

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	R_w (dB)	C	C_{tr}
R (dB)	28	30	28	33	42	50	53	39	-1	-4

7.4. COBERTURAS

A cobertura é constituída pelas asnas. A perna, elemento da asna que faz a pendente do telhado, e a linha, elemento horizontal da asna, são elementos que suportam os restantes componentes da cobertura: barrotes, ripas, varas, tábuas de forro, etc.

As dimensões definidas para cada material característico das coberturas são:

- telha Marselha: $e=1,5\text{cm}$;
- vara e forro em madeira: $e=10\text{cm}$;
- madre em madeira: $e=20\text{cm}$;
- asna (perna) em madeira: $e=20\text{cm}$;
- asna (linha) em madeira: $e=25\text{cm}$;
- tábua de forro (linha) em madeira: $e=2\text{cm}$;
- barrote (madeira): $e=7\text{cm}$;
- fasquio (madeira): $e=2\text{cm}$;
- revestimento de teto (gesso): $e=1,5\text{cm}$.

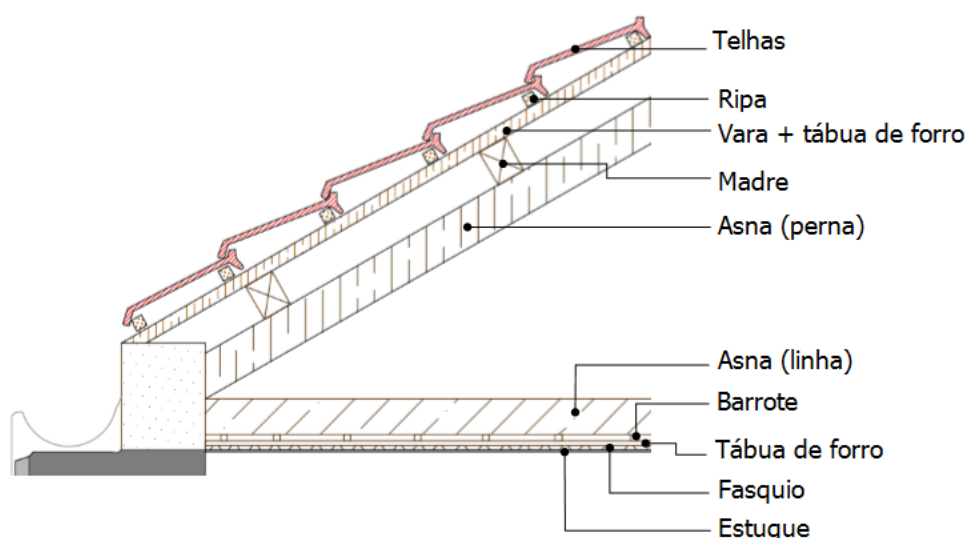


Fig.7.12. – Esquema de cobertura existente (corte transversal)

A madeira de pinho e o estuque em gesso utilizados na caracterização acústica das coberturas têm as mesmas características já apresentadas para as paredes interiores:

Tabela 7.11. – Propriedades da madeira de pinho

Madeira de pinho	Densidade	Módulo de Young	Fator de perdas
	490 kg/m ³	5 GPa	0,04

Tabela 7.12. – Propriedades do revestimento em gesso

Revestimento em gesso	Densidade	Módulo de Young	Fator de perdas
	710 kg/m ³	2 GPa	0,009

A telha Marselha, baseando no documento de Huang et al. (2009) [46] que estuda as propriedades de vários tipos de telhas cerâmicas, telhas em betão e madeira, o valor da densidade das telhas é, aproximadamente, 1385 kg/m^3 e o módulo de Young é cerca de 12 GPa. Quanto ao fator de perdas, associou-se o valor de 0,01, valor padrão utilizado usualmente quando desconhecido.

Tabela 7.13. – Propriedades da telha Marselha

Telha Marselha	Densidade	Módulo de Young	Fator de perdas
	1385 kg/m^3	12 GPa	0,01

A caracterização da transmissão sonora da cobertura existente faz-se com recurso à metodologia de Sharp, Cremer e Fahy (ver capítulo 5.2.1), e distingue-se nas seguintes partes:

- cobertura inclinada: referente à solução construtiva apoiada pela perna (asna);
- laje de esteira: referente à solução construtiva horizontal apoiada pela linha (asna).

7.4.1. COBERTURA INCLINADA

Conforme está representado na figura seguinte, a cobertura inclinada é a solução que engloba as telhas, vara, tábuas de forro, madre e perna. As ripas, madres e as pernas das asnas não são incluídas no cálculo uma vez que estas só ocorrem em determinados pontos da cobertura como estruturas de apoio, estando dispostas paralelamente e afastadas entre si (as pernas afastadas entre si cerca de 1,5 m e perpendiculares às madres que estão afastadas entre si cerca de 0,5m), o que em termos de propagação do som aéreo influenciam nos pontos em que se localizam e não de forma contínua como um painel, o que é de difícil quantificação usando a metodologia em causa. Tendo isto em consideração, para o cálculo melhor se aproximar da realidade não se contabilizou o efeito destes elementos.

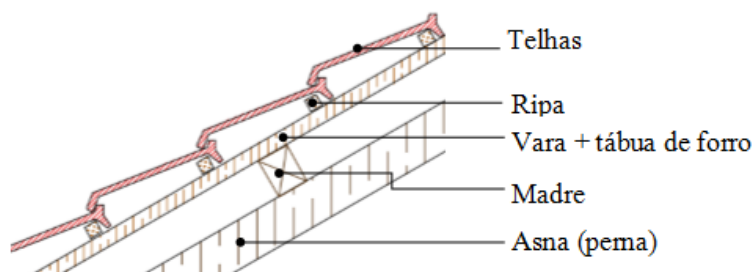


Fig.7.13. – Esquema de cobertura inclinada (corte transversal)

No gráfico da Fig.7.14. estão os valores da redução sonora para cada banda de 1/3 de oitava no intervalo de frequências do 50 aos 5000Hz.

Em suma, verifica-se que para a frequência de 250 Hz é onde isolamento sonoro é mais baixo, correspondente à frequência crítica do conjunto e que a redução sonora desta solução é melhor nas altas frequências, com valores bastante mais elevados. Ajustando à curva normalizada o índice de redução sonora R_w da cobertura inclinada existente é 39 dB.

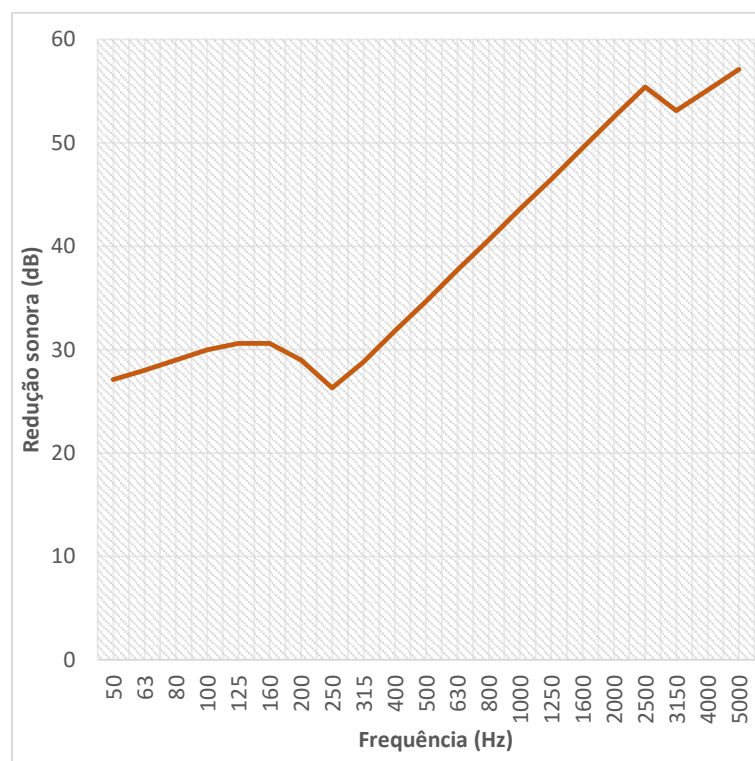


Fig.7.14. – Espectro da redução sonora da cobertura inclinada em bandas de 1/3 de oitava

Tabela 7.14. - Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da cobertura inclinada existente

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	R_w (dB)	C	C_{tr}
R (dB)	28	30	28	34	43	52	55	39	0	-3

7.4.2. LAJE DE ESTEIRA

A laje de esteira existente, situada no último piso da casa burguesa, é composta pela linha, barrote, tábua de forro, fasquio e estuque, no lado inferior do fasquio. Esta laje tem uma composição semelhante ao pavimento, com a exceção do soalho, uma vez que apenas tem a funcionalidade de teto, embora seja possível encontrar casas onde este desvão foi utilizado para mais um compartimento, o que implica a existência de um soalho ou outro tipo de revestimento, mas que já foi tratado neste trabalho como solução de pavimento. A linha, tal como a perna, e os barrotes são elementos de apoio e só acontecem em determinados pontos, contabilizar o seu efeito como contínuo seria afastar do caso real.

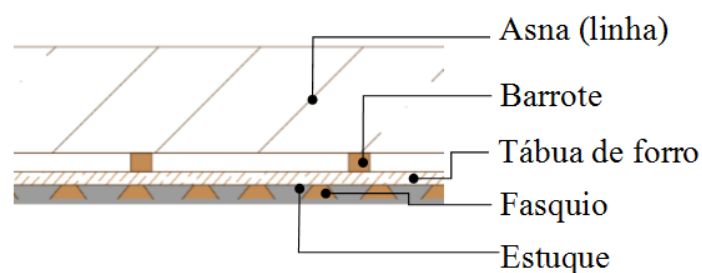


Fig.7.15. – Esquema da laje de esteira (corte transversal)

Aplicando a metodologia escolhida para a caracterização da transmissão sonora via aérea, o índice de redução sonora R_w da laje de esteira existente é 35dB. No gráfico da Fig.7.15. estão as reduções sonoras por frequência e constata-se que a frequência crítica se encontra nos 625Hz.

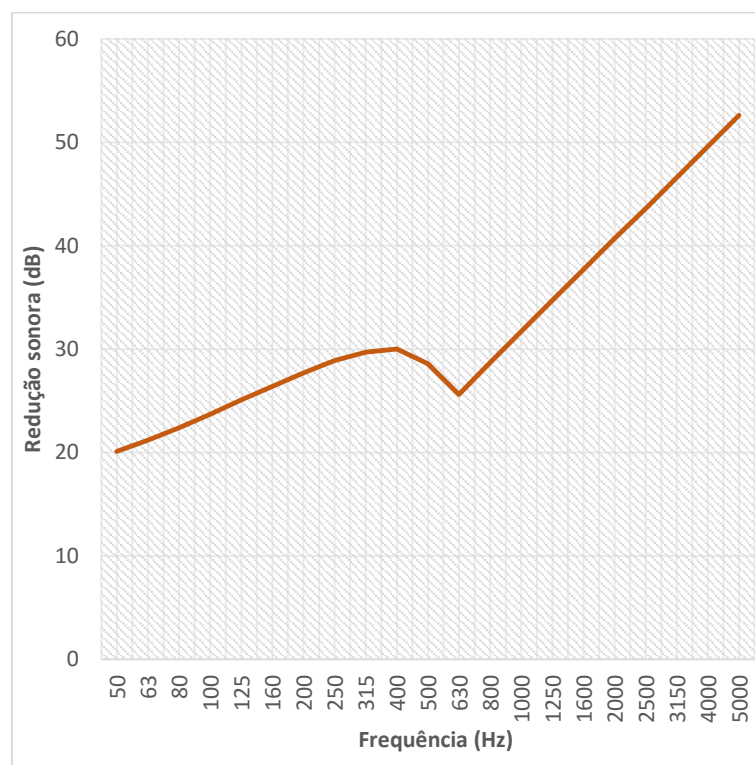


Fig.7.16. – Espectro da redução sonora da laje de esteira existente em bandas de 1/3 de oitava

Tabela 7.15. - Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da laje de esteira existente

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	R_w (dB)	C	C_{tr}
R (dB)	21	25	30	34	33	37	46	35	-1	-2

8

SOLUÇÕES REABILITADAS À BASE DE PAINÉIS COMPÓSITOS DE MADEIRA E CIMENTO

8.1. INTRODUÇÃO

A reabilitação acústica dos edifícios clássicos do Porto burguês envolve uma preocupação em preservar os elementos e materiais existentes. Infelizmente no ato de reabilitação não é possível preservar totalmente as soluções existentes, procedendo-se a uma substituição parcial dos elementos. Os materiais de maior dimensão e necessários à execução das diferentes soluções típicas destas habitações, encontrando-se num estado de conservação apto para executarem de novo as suas funções, são reutilizados, outros materiais cuja função seja o remate, fixação ou revestimento serão reutilizados caso o seu estado após remoção o permita a sua nova aplicação. Por exemplo, se a camada de revestimento estiver bastante danificada quando removida para a introdução de materiais não é espetável que seja reutilizada.

As soluções reabilitadas à base de painéis compósitos de madeira e cimento apresentadas neste capítulo correspondem à reabilitação acústica das soluções típicas da casa clássica do Porto burguês caracterizadas quanto ao isolamento sonoro a sons de condução aérea (pavimentos, paredes interiores e coberturas) e de percussão (pavimentos) no capítulo 7.

8.2. PAVIMENTOS

A caracterização acústica das soluções de pavimentos é feita com recurso aos dados obtidos dos ensaios laboratoriais descritos no capítulo 6.

Os pavimentos da casa clássica do Porto burguês são soluções construtivas com uma redução sonora R_w de 22dB, quando o pavimento não tem teto, e um R_w de 49dB, quando o pavimento tem um teto.

No isolamento a sons de percussão, a análise que se faz a cada solução divide-se no ensaio a sons de percussão com e sem a presença de um tapete de geotêxtil, a fim de determinar a eficácia do tapete nas soluções. O índice de isolamento a sons de percussão do pavimento existente sem tapete sobre o soalho é 93dB, no pavimento sem teto, e 68dB, no pavimento com teto. Com o tapete, o índice de isolamento a sons de percussão reduz para 78dB, no pavimento sem teto, e para 64dB, no pavimento com teto.

As seis soluções propostas para a reabilitação acústica dos dois tipos de pavimentos são à base de painéis compósitos de madeira e cimento. Além destes painéis, são também introduzidos outros materiais resilientes ou absorventes com o objetivo de distinguir a potencialidade não só destes materiais, mas também da sua combinação com os painéis compósitos de madeira e cimento na reabilitação acústica.

Das seis soluções, da solução 1 à solução 6, as soluções 1, 2 e 3 são soluções de reabilitação acústica de pavimentos sem teto, comparando sempre com a solução existente sem teto caracterizada no capítulo 7.2., e as soluções 4, 5 e 6 são soluções de reabilitação acústica de pavimentos com teto e lã de rocha na caixa de ar, comparando sempre com a solução existente com teto caracterizada no capítulo 7.2.

Os resultados do isolamento a sons de condução aérea por modelo teórico apresentados no capítulo 8.2.7., capítulo onde se fazem algumas comparações e pequenas conclusões, são resultantes da aplicação da metodologia de previsão baseada em Sharp, Cremer e Fahy apresentada no capítulo 5.3. 1.. Todos os materiais, suas propriedades e características, estão descritos no capítulo 6.

8.2.1. SOLUÇÃO 1

A primeira solução de reabilitação acústica de pavimentos sem teto consiste na introdução de uma camada de painéis compósitos de madeira e cimento (Viroc) sobre as vigas e uma camada de material resiliente (Aglomex 90FR) fazendo a separação entre o soalho e os painéis compósitos.

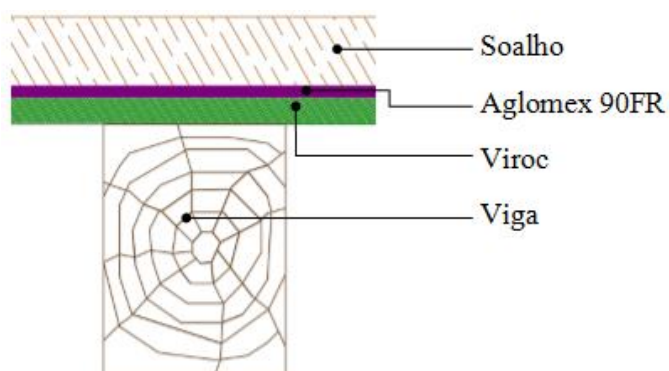


Fig. 8.1. – Esquema da solução 1 (corte transversal) e legenda

A solução 1 tem o espectro de redução sonora apresentado no gráfico da Fig.8.2. e um índice de redução sonora R_w de 31dB, segundo os dados obtidos dos ensaios laboratoriais.

Comparando o espectro da solução 1 com o espectro da solução existente sem teto constata-se que nas baixas frequências o ganho na redução é aproximadamente constante. Nas médias e altas frequências, acima dos 800Hz, aproximadamente, o ganho é substancial, atingindo mais 22dB que a solução existente nas frequências mais altas.

Esta nova solução, a introdução de painéis compósitos de madeira e cimento e uma camada resiliente na solução existente, aumentou em mais de 9dB no índice de redução sonora R_w da solução existente.

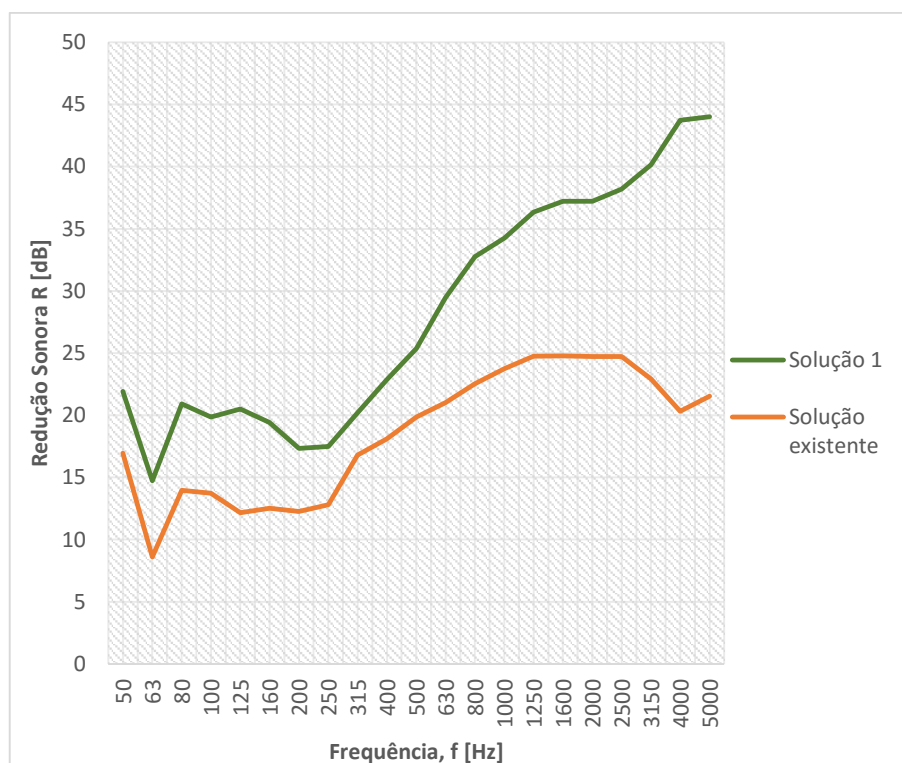


Fig. 8.2. – Espectro da redução sonora da solução 1 e da solução existente em bandas de 1/3 de oitava

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	R_w (dB)	C	C_{tr}
R (dB)	17	19	18	25	34	37	42	31	-2	-5

Nos ensaios de isolamento a sons de percussão, como se pode observar na Tabela 8.2., a solução 1 tem um índice de isolamento a sons de percussão $L_{n,w}$ de 83dB. Quando se coloca o tapete de geotêxtil sobre o soalho (Tabela 8.3.) este nível desce para os 72dB, menos 11dB, ou seja, o tapete tem uma eficácia de 11dB nesta solução de reabilitação.

Comparando com a solução existente, ver gráfico da Fig.8.4., a solução 1 apresenta melhores resultados, porém não melhores que a solução existente com tapete. A solução 1 com tapete é a solução melhor isolante a sons de percussão das quatro soluções aqui em análise.

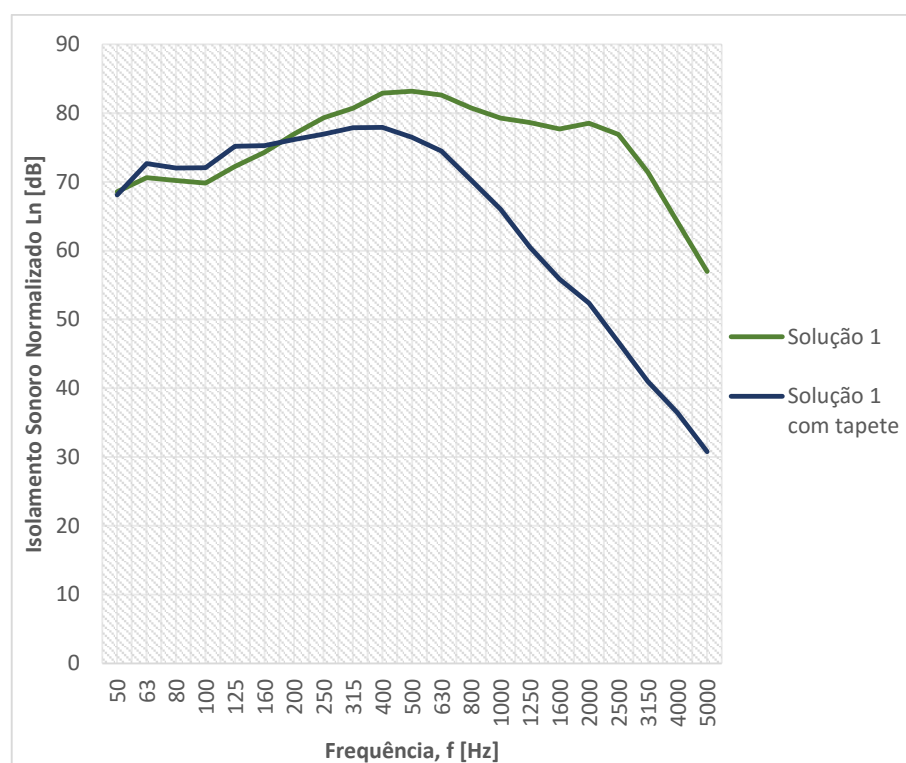


Fig. 8.3. – Espectros dos níveis de pressão sonora da solução 1 e solução 1 com tapete em bandas de 1/3 de oitava

Tabela 8.2. – Níveis de pressão sonora por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 1

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	$L_{n,w}$ (dB)	C_i
L (dB)	69	71	78	82	79	77	60	83	-7

Tabela 8.3. – Níveis de pressão sonora por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 1 com tapete

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	$L_{n,w}$ (dB)	C_i
L (dB)	70	74	77	76	64	50	34	72	-1

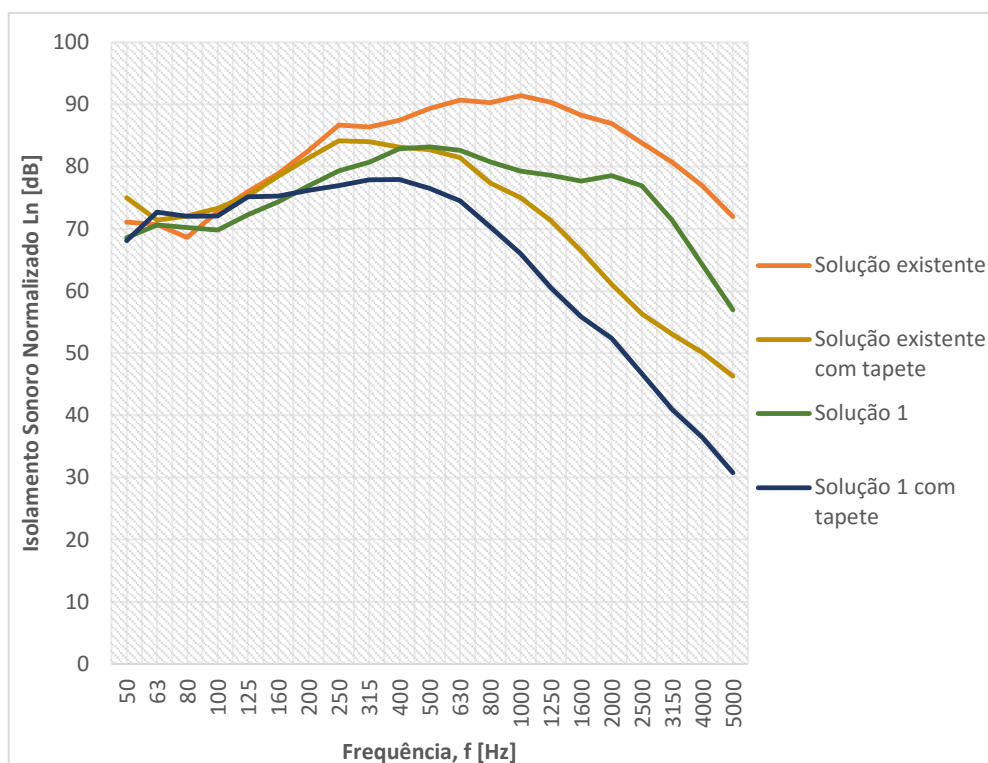


Fig. 8.4. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 1 e solução 1 com tapete vs solução existente e solução existente com tapete

8.2.2. SOLUÇÃO 2

A solução 2 é uma proposta de solução semelhante à solução 1 exceto no material resiliente que faz a separação entre o soalho e os painéis compostos de madeira e cimento (Viroc). Esta segunda solução tem como camada resiliente mantas de geotêxtil que fazem a separação entre o soalho e a camada de painéis de madeira e cimento que está apoiada sobre as vigas.

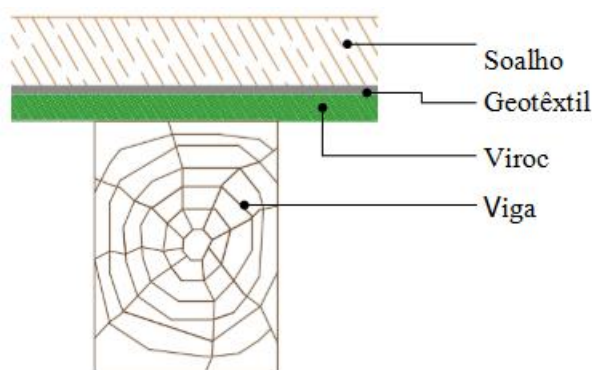


Fig. 8.5. – Esquema da solução 2 (corte transversal) e legenda

Dos ensaios laboratoriais conclui-se que a redução sonora R_w é 31dB, mesmo valor que na solução 1. Os espectros destas duas soluções, a uma primeira vista, parecem semelhantes, mas a solução 2 tem um melhor desempenho no isolamento a sons aéreos nas baixas e altas frequências, com valores de redução um pouco superiores.

Comparando a solução 2 com a solução existente, observa-se no gráfico da Fig.8.6. que a relação entre espectros é, mais uma vez, algo semelhante ao já visto no caso da solução 1, no entanto a diferença entre o traçado do espectro 2 e a solução existente é maior que a diferença entre o espectro da solução 1 em relação à solução existente.

Quanto ao índice R_w o desempenho desta solução é igual à solução 1, demonstrando que no isolamento a sons aéreos a potencialidade está maioritariamente nos painéis compósitos de madeira e cimento.

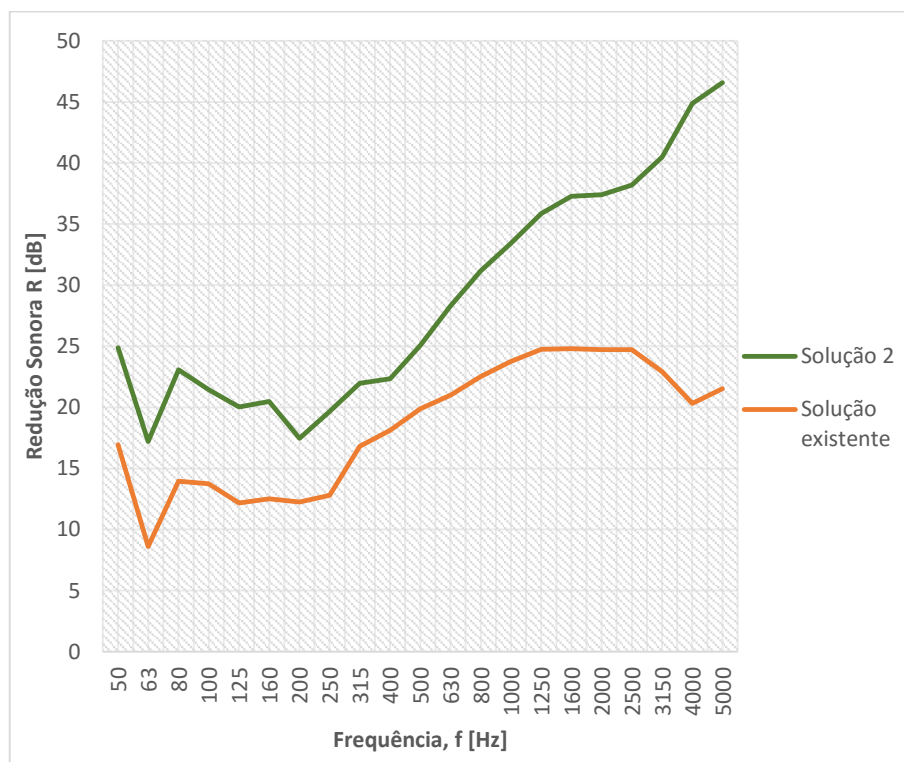


Fig. 8.6. –Espectros da redução sonora da solução 2 e solução existente em bandas de 1/3 de oitava

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	R_w (dB)	C	C_{tr}
R (dB)	20	20	19	24	33	37	43	31	-2	-4

No isolamento a sons de percussão o caso é semelhante, o índice de isolamento a sons de percussão $L_{n,w}$ sem e com tapete da solução 2 tem valores praticamente iguais à solução 1. Não existe muita diferença no desempenho de isolamento sonoro entre estas duas primeiras soluções de reabilitação. A conclusão que se retira é que o desempenho no isolamento sonoro a sons de percussão e aéreo dos materiais resilientes em geotêxtil e em Aglomex 90FR em pavimentos típicos da casa clássica do Porto burguês sem teto e com painéis compósitos de madeira e cimento sobre as vigas é aproximadamente o mesmo.

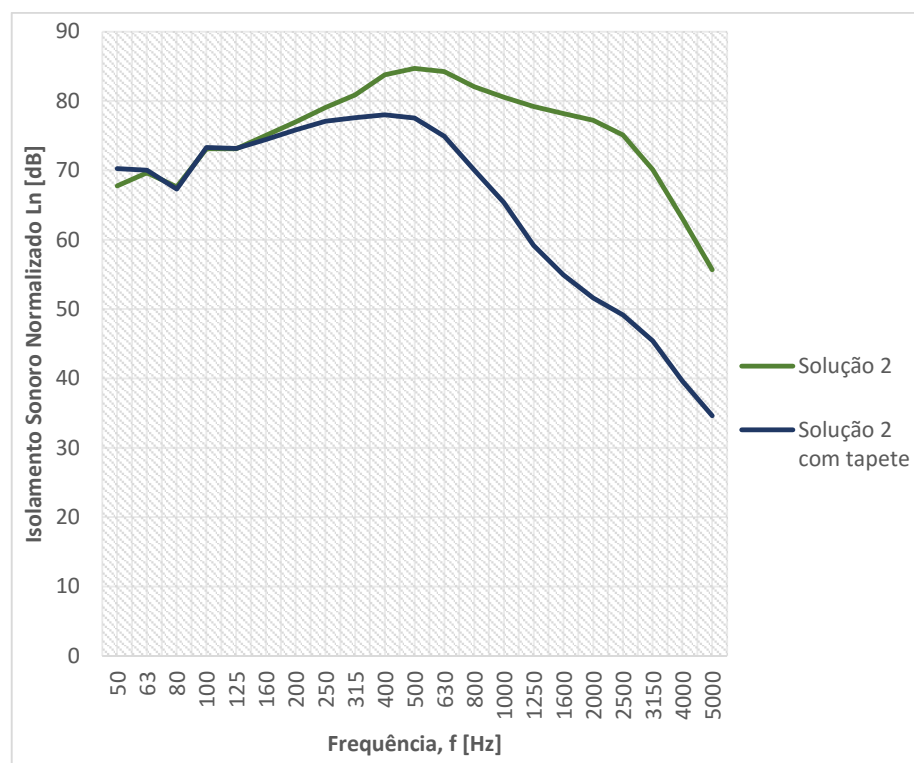


Fig. 8.7. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 2 e solução 2 com tapete em bandas de 1/3 de oitava

Tabela 8.5. – Níveis de pressão sonora por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 2

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	$L_{n,w}$ (dB)	C_i
L (dB)	68	74	79	84	80	77	60	83	-6

Tabela 8.6. – Níveis de pressão sonora por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 2 com tapete

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	$L_{n,w}$ (dB)	C_i
L (dB)	69	74	77	77	63	51	38	71	0

Em relação à solução existente a solução 2 apresenta melhores resultados, porém não melhores que a solução existente com tapete. A solução 2 com tapete é a solução melhor isolante a sons de percussão das quatro soluções aqui em análise.

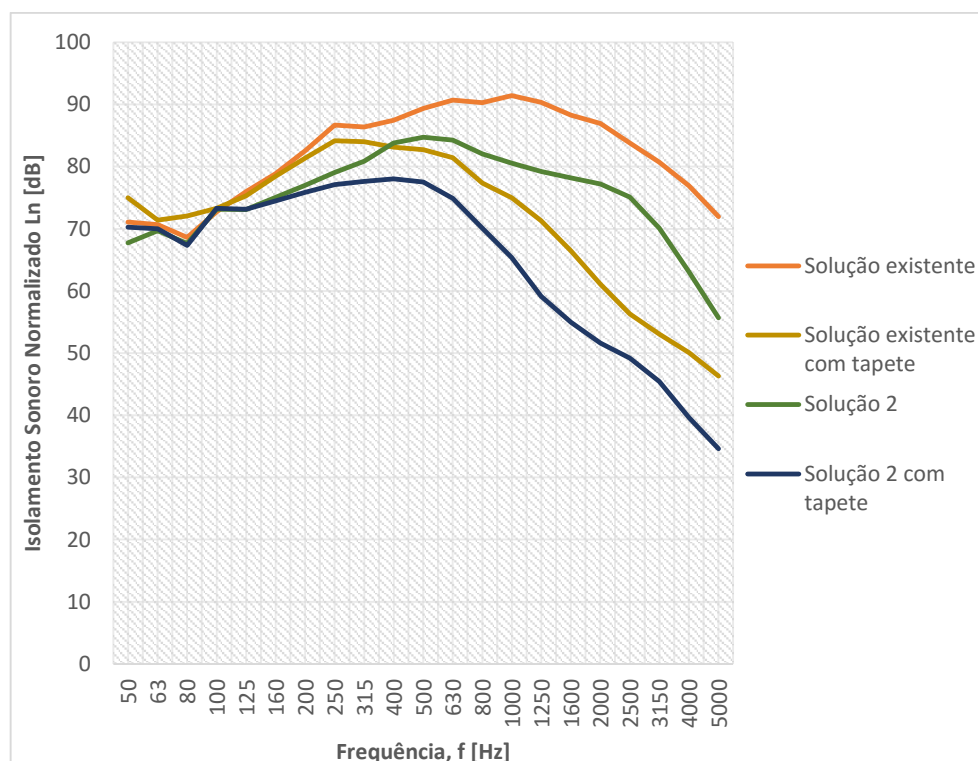


Fig. 8.8. –Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 2 e solução 2 com tapete vs solução existente e solução existente com tapete

8.2.3. SOLUÇÃO 3

A solução 3 tem uma composição idêntica à solução 1 com um adicional apoio resiliente colocado em cada viga. O apoio resiliente é feito do mesmo material que a camada resiliente que está entre o soalho e os painéis compósitos de madeira e cimento, mas de uma densidade superior (200kg/m^3).

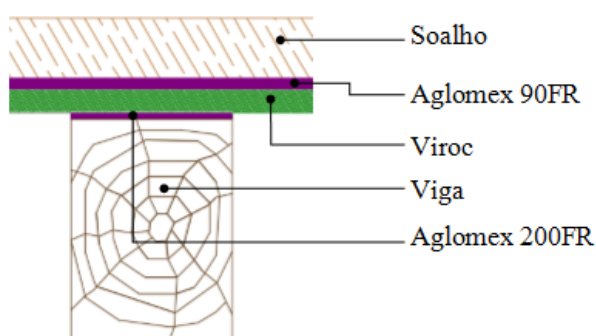


Fig. 8.9. –Esquema da solução 3 (corte transversal) e legenda

Esta solução tem um índice de redução sonora de 32dB, o que significa que os apoios resilientes de Aglomex 200FR pouco fizeram aumentar a redução sonora. Um aumento muito reduzido e que não compensa o investimento em material resiliente. No gráfico da Fig.8.10., que relaciona a solução existente e a solução 3, verifica-se que nas baixas frequências esta terceira solução, ao contrário das soluções anteriores, apresenta reduções mais constantes até aos 400Hz, com menos oscilações. Dos 400Hz aos 5000Hz o comportamento é muito semelhante às soluções anteriores.



Fig. 8.10. – Espectros da redução sonora da solução 3 e solução existente em bandas de 1/3 de oitava

Tabela 8.7. – Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 3

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	R_w (dB)	C	C_{tr}
R (dB)	21	20	19	25	36	41	45	32	-2	-5

Quanto aos sons de percussão (Fig.8.11.), o isolamento sonoro da solução 3 é maior que na solução 1 em 4dB, a solução 1 é exatamente igual à solução 3 mas sem a existência dos apoios resilientes. Isto significa que os apoios resilientes beneficiam a solução 1 em 4dB no isolamento sonoro a sons de percussão. Quando é instalado um tapete sobre o soalho da solução 3 o nível de pressão sonora reduz 9dB, o índice $L_{n,w}$ obtido é 70dB, valor próximo dos observados nas soluções anteriores que também têm tapete, constatando-se, portanto, que existindo o tapete com a introdução de apoios resilientes o benefício é muito pouco no isolamento sonoro a sons de percussão.

Relativamente à comparação com a solução existente, mais uma vez a solução existente com tapete é mais isolante nas médias e altas frequências. A solução 3 com tapete é de todas as quatro representadas na Fig.8.12 a melhor no isolamento a sons de percussão, para frequências acima dos 125Hz.

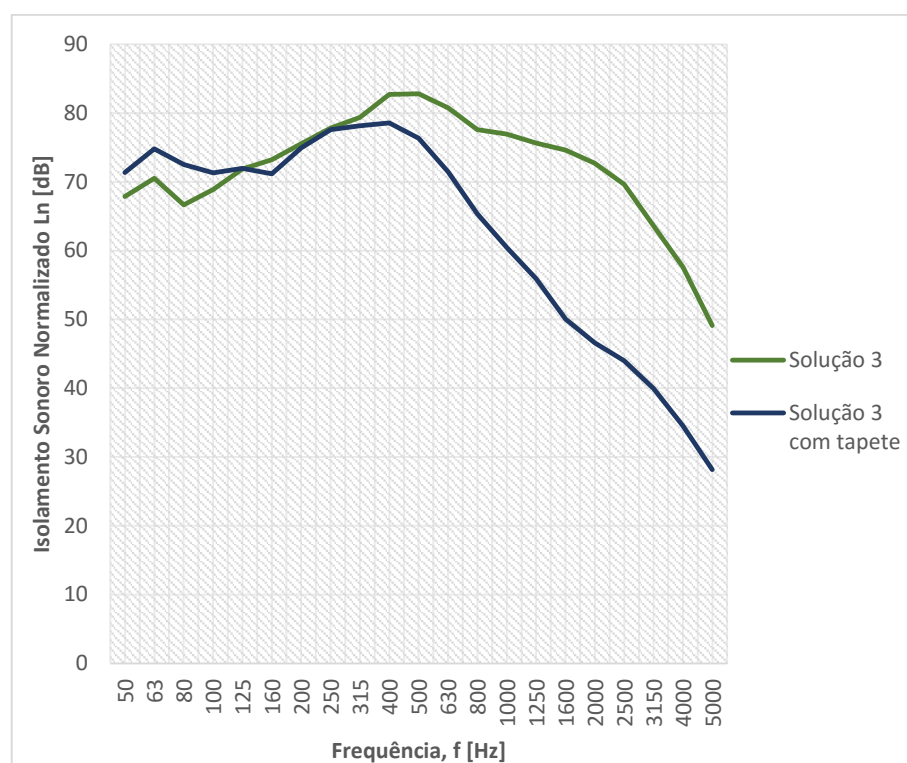


Fig. 8.11. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 3 e solução 3 com tapete em bandas de 1/3 de oitava

Tabela 8.8. – Níveis de pressão sonora por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 3

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	$L_{n,w}$ (dB)	C_i
L (dB)	68	71	77	82	77	72	53	79	-4

Tabela 8.9. – Níveis de pressão sonora por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 3 com tapete

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	$L_{n,w}$ (dB)	C_i
L (dB)	72	71	76	74	59	46	31	70	0

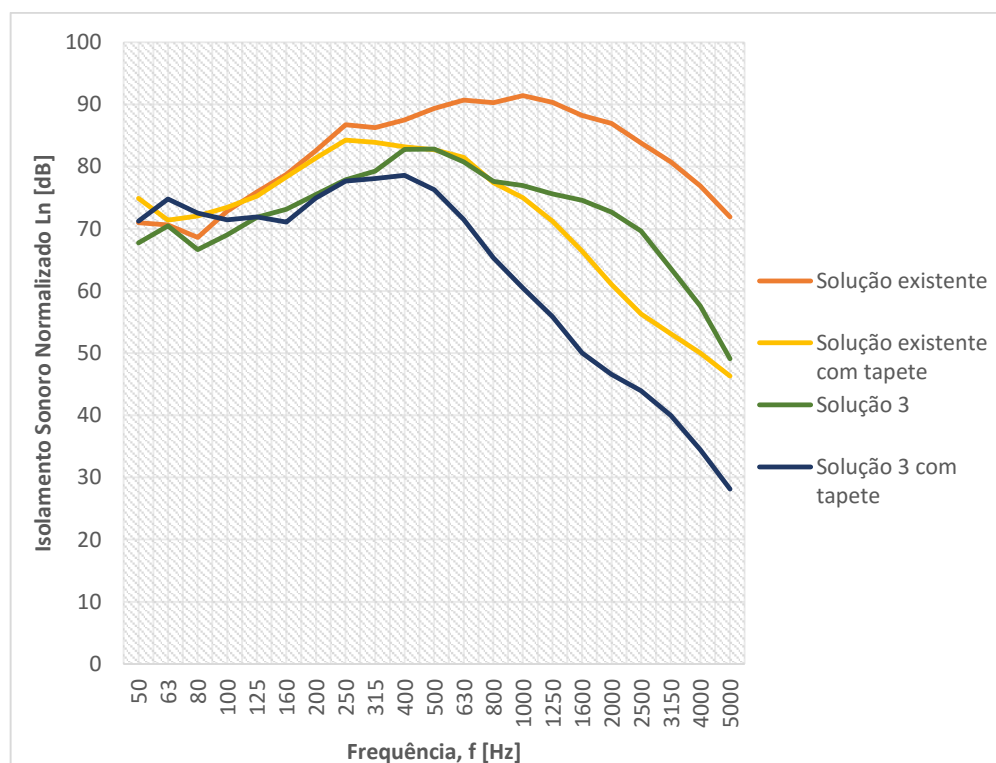


Fig. 8.12. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 3 e solução 3 com tapete vs solução existente e solução existente com tapete

8.2.4. SOLUÇÃO 4

A solução 4 é a primeira solução de reabilitação acústica de pavimentos com teto. A instalação do teto permite a introdução de uma camada de lã de rocha a preencher parcialmente a caixa de ar. Desde a viga até ao soalho esta solução tem a mesma composição que a solução 3, apoio resiliente em cada viga, painéis compósitos de madeira e cimento, camada resiliente do mesmo material que o apoio resiliente, mas com menor densidade.

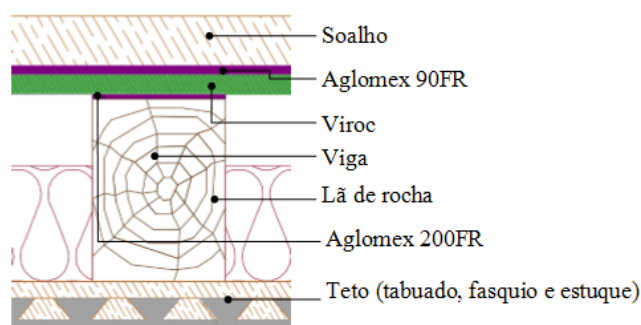


Fig. 8.13. –Esquema da solução 4 (corte transversal) e legenda

Nos ensaios de isolamento a sons de condução aérea obteve-se o espectro de redução sonora representado no gráfico da Fig.8.14. e o índice de redução sonora desta solução é 54dB. Um isolamento sonoro bastante superior ao obtido em todos os casos de soluções de reabilitação de pavimentos sem teto.

A solução existente com teto tem 49dB de redução sonora, o que indica que esta solução tem um incremento de 6dB em relação à solução existente.

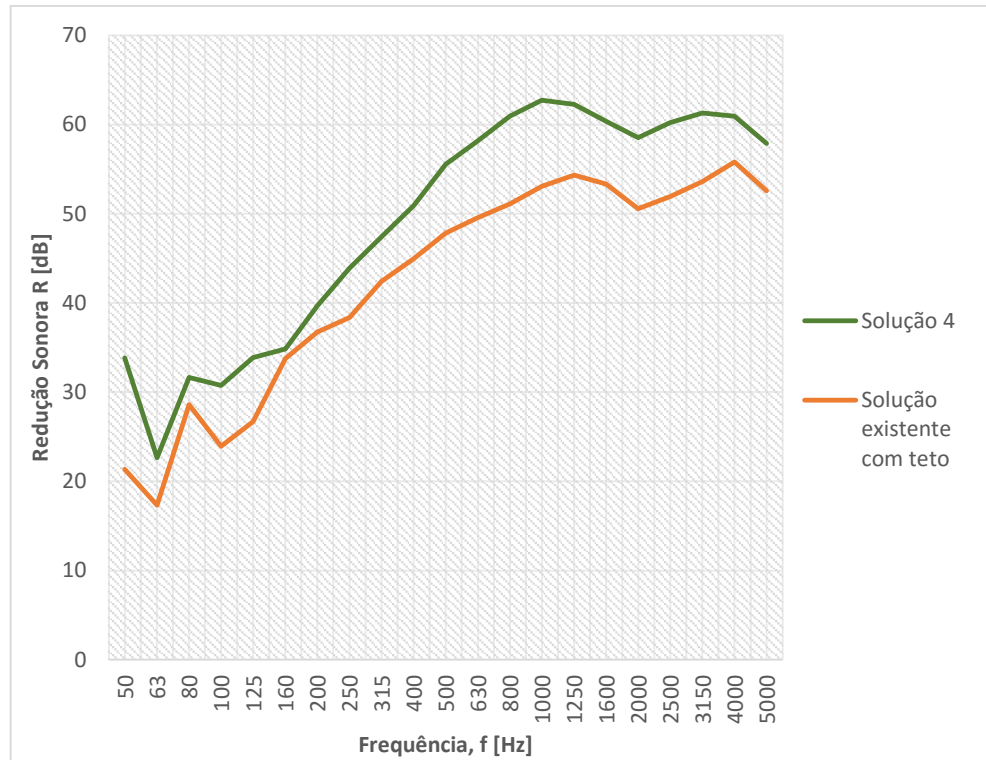


Fig. 8.14. – Espectros da redução sonora da solução 4 e solução existente com teto em bandas de 1/3 de oitava

Tabela 8.10. - Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 4										
Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	R_w (dB)	C	C_{tr}
R (dB)	26	32	42	54	62	60	60	54	-2	-8

Em ambos os ensaios de determinação do isolamento a sons de percussão da solução 4 sem e com o tapete, o índice de isolamento a sons de percussão $L_{n,w}$ obtido foi de 55dB. A solução 4 com tapete é a melhor nas frequências altas e médias, sensivelmente a partir dos 200Hz, em relação à solução 4 sem tapete e à existente sem tapete e com tapete. Contudo, nas frequências mais baixas, até sensivelmente aos 200Hz, a solução 4 tem níveis de pressão sonora a sons de percussão menores que a mesma solução com tapete, o que faz com que os índices $L_{n,w}$ das soluções 4 sejam iguais. Nesta solução 4, o tapete não aumento o isolamento a sons de percussão. Pelo contrário, o que se observa é o tapete a “facilitar” a transmissão de sons de percussão, sobretudo nas frequências baixas, resultando um índice de isolamento $L_{n,w}$ do mesmo valor que a solução sem a presença do tapete.

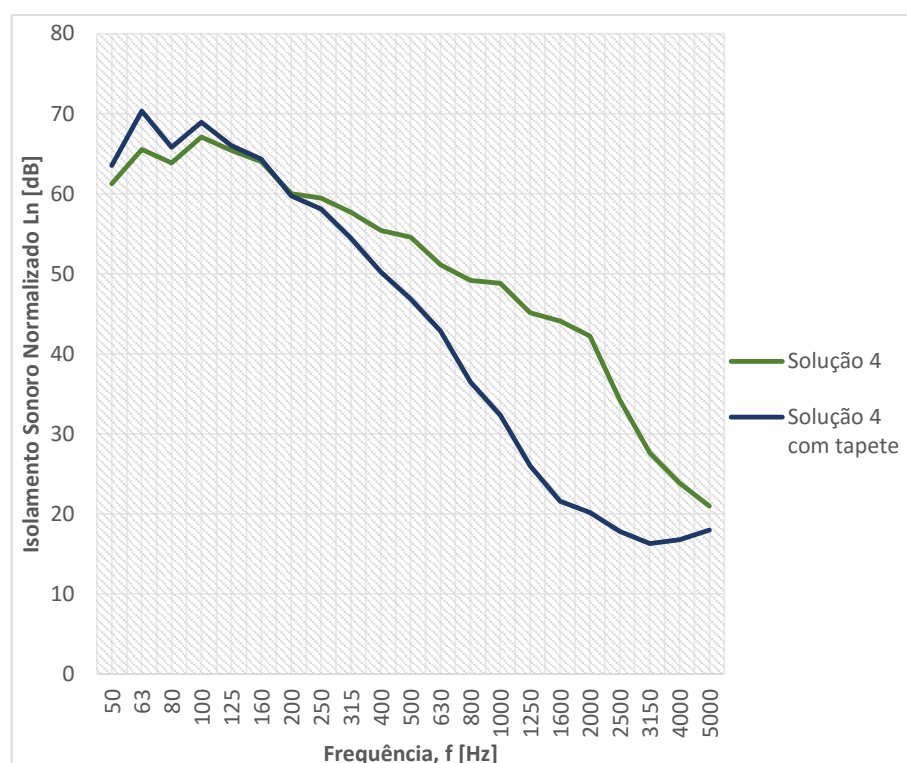


Fig. 8.15. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 4 e solução 4 com tapete em bandas de 1/3 de oitava

Tabela 8.11. - Níveis de pressão sonora por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 4

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	$L_{n,w}$ (dB)	C_i
L (dB)	63	65	59	53	47	38	23	55	2

Tabela 8.12. - Níveis de pressão sonora por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 4 com tapete

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	$L_{n,w}$ (dB)	C_i
L (dB)	66	66	57	46	30	20	17	55	2

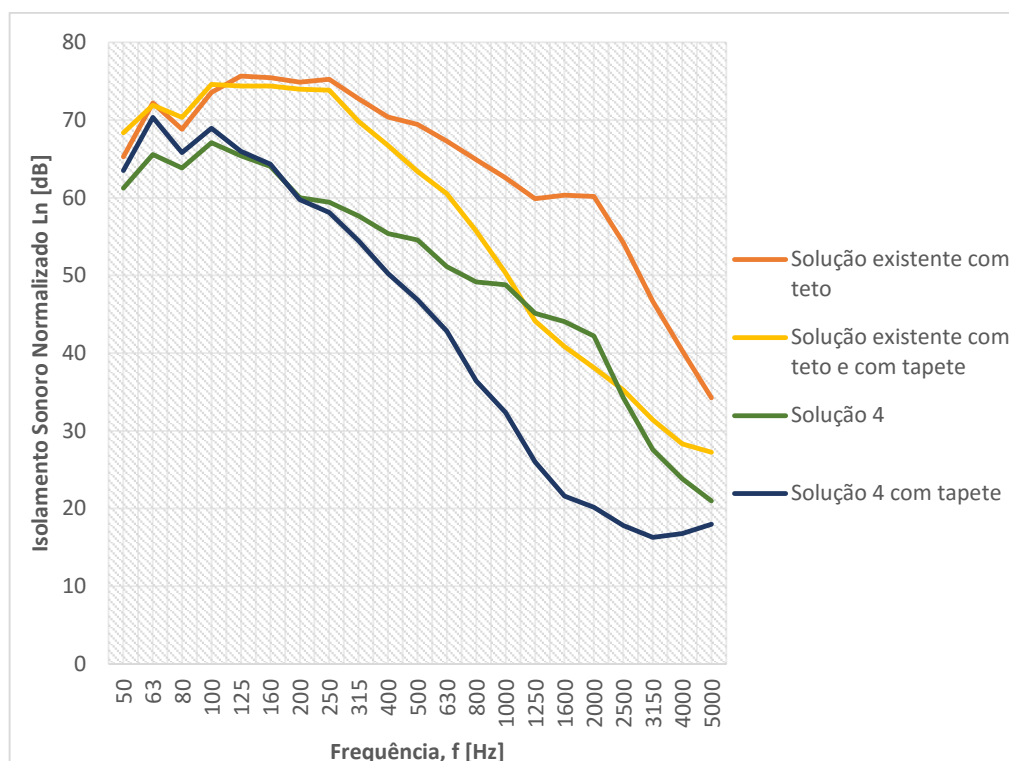


Fig. 8.16. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 4 e solução 4 com tapete vs solução existente com teto e solução existente com teto e tapete

8.2.5. SOLUÇÃO 5

A segunda solução de reabilitação de pavimentos com teto, a solução 5, tem uma composição em tudo igual à solução 1 acrescentando o teto, revestido inferiormente com uma camada de estuque, e uma camada de lã de rocha a preencher parcialmente a caixa de ar.

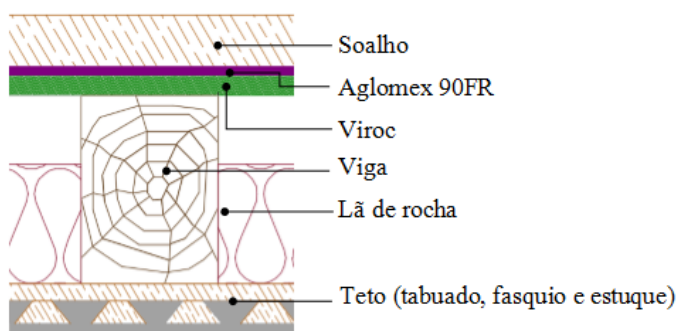


Fig. 8.17. –Esquema da solução 5 (corte transversal) e legenda

Esta nova solução tem um índice de redução sonora R_w igual a 54dB, o mesmo que o da solução 4 uma vez que, como já constatado para a solução 3, a colocação de apoios resilientes em pouco influencia o desempenho da solução no isolamento sonoro a sons de condução aérea e, por conseguinte, o espectro é bastante idêntico e o índice de redução R_w é do mesmo valor.

O gráfico da Fig.8.18. compara os espectros da solução 5 e da solução existente com teto e conclui-se que, correlacionando também com a solução anterior (solução 4), esta solução tem aproximadamente o mesmo incremento no isolamento sonoro a sons de condução aérea. No entanto é possível admitir que esta solução é pior no isolamento a sons aéreos porque nas frequências próximas dos 80 e dos 180Hz os dois espectros estão mais próximos.



Fig. 8.18. – Espectros da redução sonora da solução 5 e solução existente com teto em bandas de 1/3 de oitava

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	R_w (dB)	C	C_{tr}
R (dB)	24	33	41	53	60	58	59	54	-3	-8

A Fig.8.19 apresenta os espectros do pavimento da solução 5 sem tapete e com tapete resultantes dos ensaios de isolamento a sons de percussão. Os índices de isolamento a sons de percussão da solução 5 sem e com tapete foram superiores aos obtidos para a solução 4 pois a solução 5 não conta com o benefício dos apoios resilientes. É aqui que se constata que os apoios resilientes em Aglomex 200FR têm como potencialidade a redução do índice de isolamento a sons de percussão deste pavimento em 3dB, sem e com tapete de geotêxtil. No conjunto, a combinação dos painéis compósitos de madeira e cimento, camada resiliente e lâ de rocha aumentam o isolamento sonoro a sons de percussão em 10dB e 5dB em relação à solução existente, no caso sem a existência do tapete e no caso de existir tapete, respetivamente.

O cenário observado para as baixas frequências na solução 4, nesta solução é ainda mais gravoso. A solução com tapete isola menos que a solução sem tapete até cerca dos 250Hz, obtendo,

consequentemente, um índice $L_{n,w}$ maior, com mais 1dB, isto é, tem um desempenho no isolamento sonoro a sons de percussão menor.

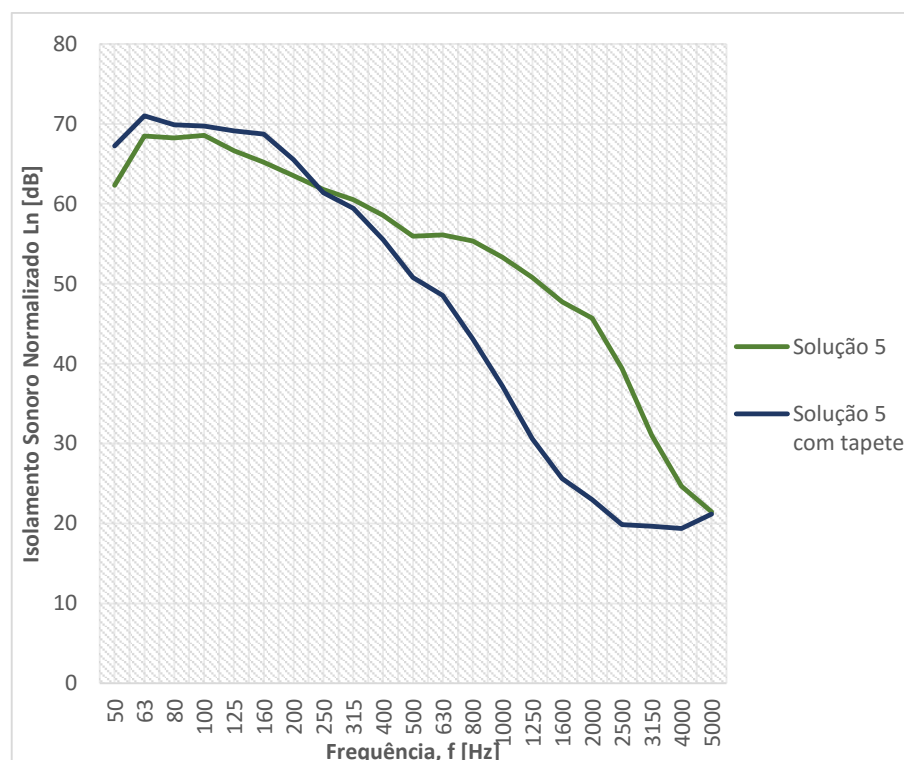


Fig. 8.19. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 5 e solução 5 com tapete em bandas de 1/3 de oitava

Tabela 8.14. - Níveis de pressão sonora por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 5

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	$L_{n,w}$ (dB)	C_i
L (dB)	65	67	62	57	53	43	24	58	0

Tabela 8.15. - Níveis de pressão sonora por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 5 com tapete

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	$L_{n,w}$ (dB)	C_i
L (dB)	69	69	61	51	34	22	20	59	1

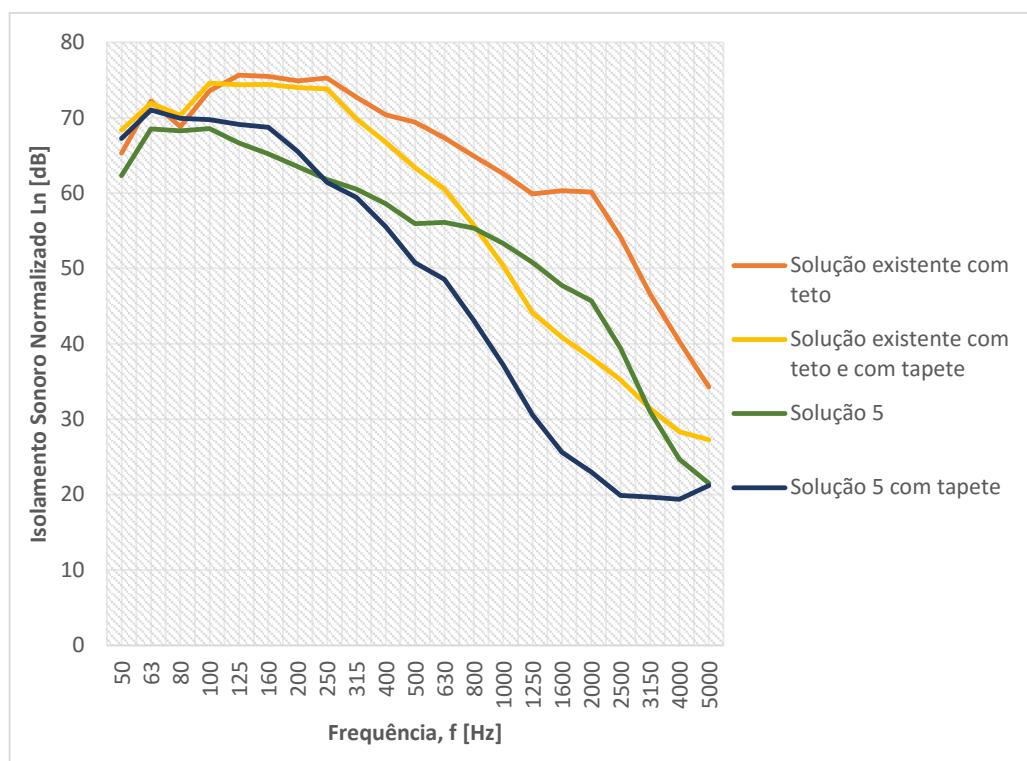


Fig. 8.20. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 5 e solução 5 com tapete vs solução existente com teto e solução existente com teto e com tapete

8.2.6. SOLUÇÃO 6

A solução 6 tem como composição um teto estucado (estruque em gesso), camada de lã de rocha a preencher parcialmente a caixa de ar, uma camada de painéis compostos de madeira e cimento sobre as vigas e, a fazer a separação entre estas e o soalho, uma camada resiliente em geotêxtil, ou seja, a solução 5 com o geotêxtil a substituir a camada resiliente de Aglomex 90FR.

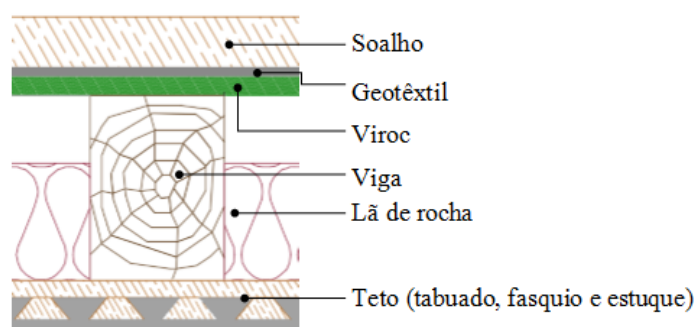


Fig. 8.21. –Esquema da solução 6 (corte transversal) e legenda

Esta solução tem um índice de redução sonora R_w de 54dB e um espectro muito semelhante à solução 5. O desempenho no isolamento sonoro da mesma solução com camada resiliente em Aglomex ou em geotêxtil difere em apenas 1dB, refletindo, portanto, idênticas potencialidades acústicas ao nível de sons aéreos quando aplicadas neste tipo de pavimentos.

Quando comparada com a solução existente, esta sexta solução de reabilitação de pavimentos, manifesta um mesmo incremento no intervalo de frequências em análise e o aumento no índice de redução sonora é de 5dB (ver Fig.8.22. e Tabela 8.16.).

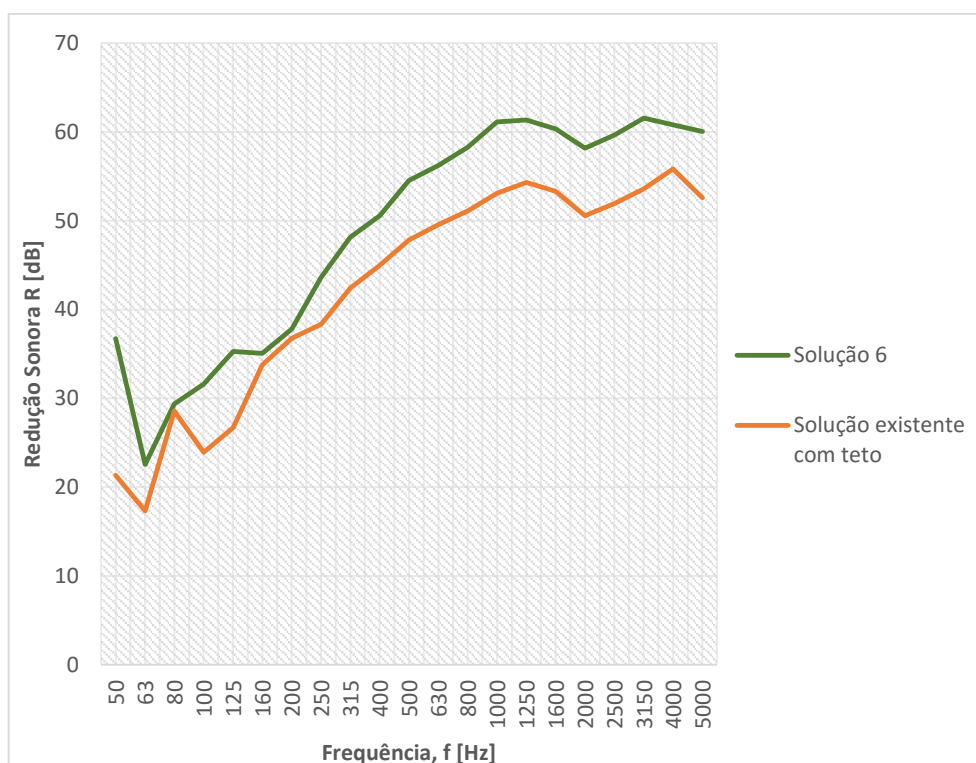


Fig. 8.22. – Espectros da redução sonora da solução 6 e solução existente com teto em bandas de 1/3 de oitava

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	R_w (dB)	C	C_{tr}
R (dB)	26	33	41	53	60	59	60	54	-2	-8

O índice de isolamento a sons de percussão $L_{n,w}$ da solução 6 sem a presença do tapete e com o tapete é 58dB e 59dB, respetivamente. Comparando com os mesmos índices da solução 5 não há diferença, contudo é de evidenciar que esta solução apresenta melhores valores de níveis de pressão sonora nas baixas frequências enquanto que no caso da solução 5 os valores mais baixos estão nas frequências mais altas.

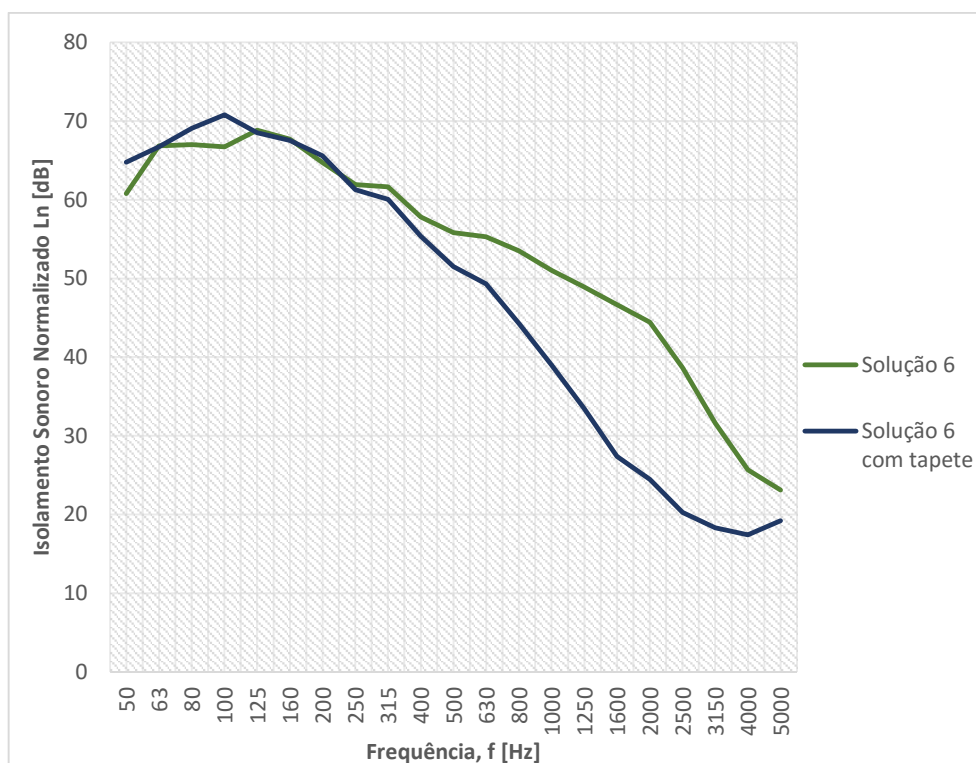


Fig. 8.23. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 6 e solução 6 com tapete em bandas de 1/3 de oitava

Tabela 8.17. - Níveis de pressão sonora por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 6

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	$L_{n,w}$ (dB)	C_i
L (dB)	64	68	63	56	51	42	26	58	1

Tabela 8.18. - Níveis de pressão sonora por bandas de oitava, $L_{n,w}$ e C_i da solução 6 com tapete

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	$L_{n,w}$ (dB)	C_i
L (dB)	67	69	62	51	37	23	18	59	1

Confrontando com a solução existente, as soluções 6 são as que melhor isolam ao nível de sons de percussão. A solução 6 com tapete apresenta valores de pressão sonora mais baixos, comprovando que o tapete é um benefício no isolamento a sons de percussão, e constata-se também o cenário nas baixas frequências onde a solução sem tapete tem um melhor desempenho levando a que o índice de isolamento sonoro $L_{n,w}$ destas duas seja aproximadamente do mesmo valor.

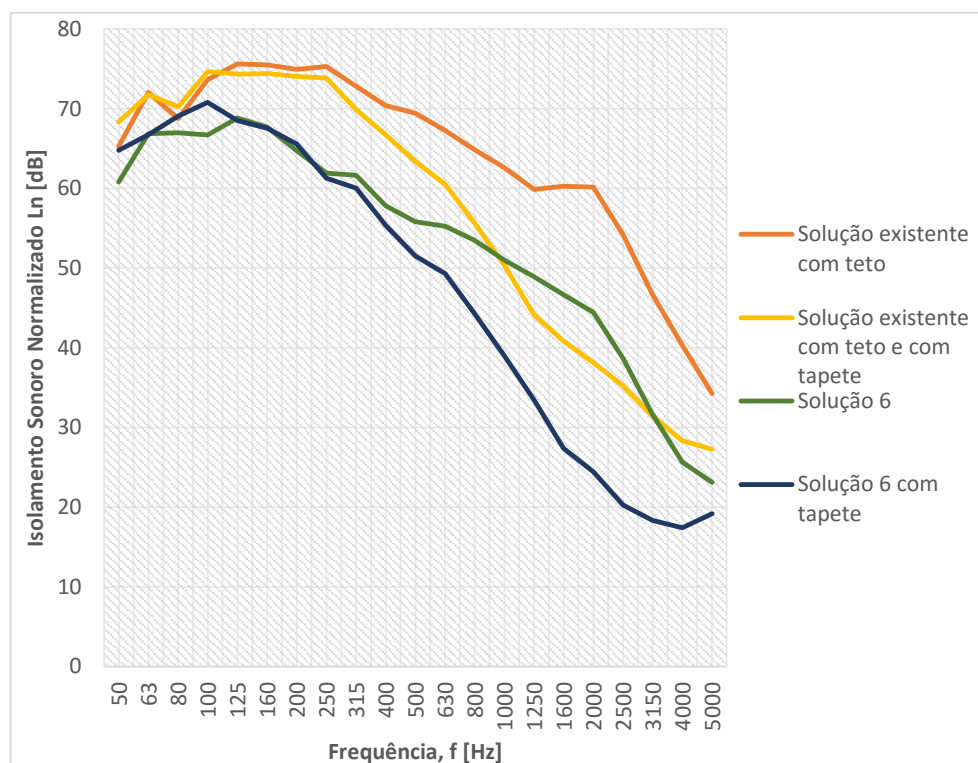


Fig. 8.24. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão da solução 6 e solução 6 com tapete vs solução existente com teto e solução existente com teto e com tapete

8.2.7. SÍNTESE DE RESULTADOS E COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS OBTIDOS EM LABORATÓRIO E POR MODELO TEÓRICO

8.2.7.1. Pavimentos sem teto

Em suma, os índices de redução sonora, os índices de isolamento a sons de percussão sem e com tapete e a respetiva eficácia do tapete da solução existente de pavimentos sem teto e das três soluções de reabilitação acústica estão presentes na Tabela 8.19.

Tabela 8.19. – Tabela resumo dos índices de isolamento obtidos dos ensaios laboratoriais à solução existente sem teto e às soluções 1, 2 e 3

	R_w	$L_{n,w}$	$L_{n,w}$ com tapete	ΔL do tapete
Solução existente	21	93	78	15
Solução 1	31	83	72	11
Solução 2	31	83	71	12
Solução 3	32	79	70	9

Aplicando a metodologia teórica baseada em Sharp, Cremer e Fahy (ver Fig.8.25) conclui-se que apesar de os espectros não coincidirem, possivelmente devido à incapacidade de ensaiar um pavimento próximo da solução real, da solução que se ensaiou, os valores dos índices de redução sonora R_w são próximos

dos obtidos nos ensaios laboratoriais, com diferenças entre os 3 e 4 dB, tendendo em todos os casos a subestimar como previsto no capítulo 5.3.1.

Porém, é possível explicar que a frequência crítica no modelo teórico está em frequências mais baixas devido à frequência crítica das vigas e os picos mínimos que se observam nas frequências próximas dos 200Hz nos três gráficos da solução 1, 2 e 3 são devidos à frequência de ressonância das vigas uma vez que se comprova pelo método baseado no livro “*Engineering Noise Control*” [43] que a primeira frequência de ressonância das vigas com o soalho e dos próprios painéis compostos de madeira e cimento se encontra entre os 190-250 Hz.

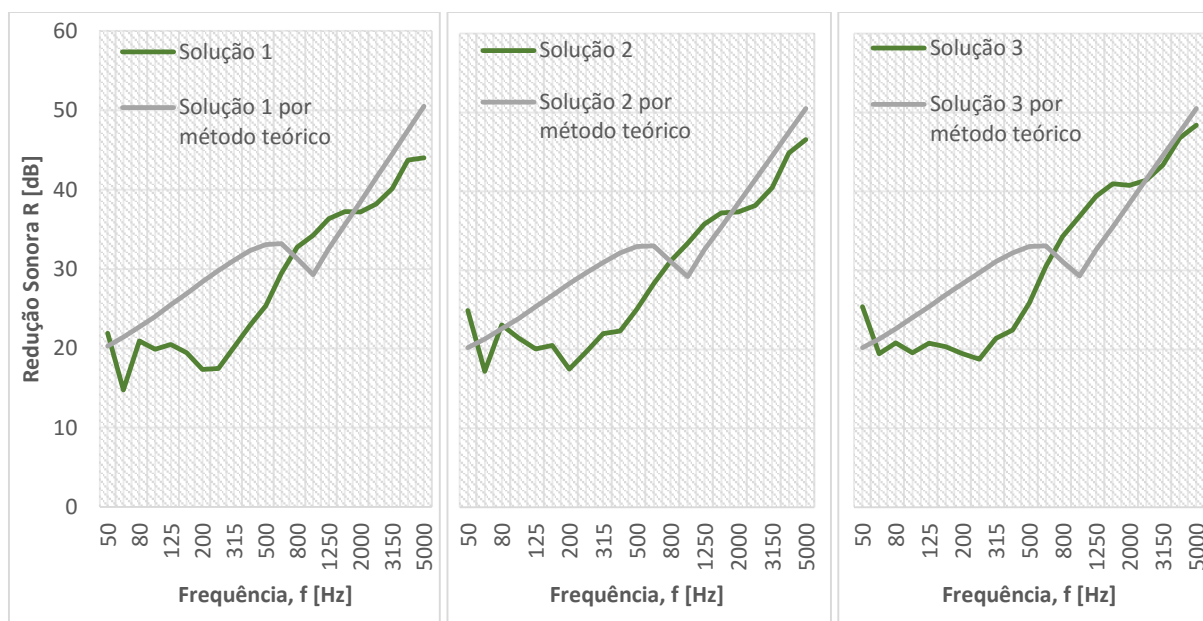


Fig. 8.25. – Gráficos de comparação entre espectros da redução sonora das soluções 1, 2 e 3 obtidos em laboratório e pelo modelo teórico, em bandas de 1/3 de oitava

Tabela 8.20. – Valor dos índices R_w resultantes dos ensaios laboratoriais e por modelo teórico às soluções 1, 2 e 3, e a diferença entre estes

	Solução 1	Solução 2	Solução 3
Ensaio de laboratório	31dB	31dB	32dB
Modelo teórico	35dB	35dB	35dB
Diferença	+4dB	+4dB	+3dB

8.2.7.2. Pavimentos com teto

Na Tabela 8.21. estão presentes os índices de redução sonora, índices de isolamento a sons de percussão sem e com tapete e a respetiva eficácia do tapete da solução existente de pavimentos sem teto e das três soluções de reabilitação acústica.

Tabela 8.21. – Tabela resumo dos índices de isolamento obtidos dos ensaios laboratoriais à solução existente com teto e às soluções 4, 5 e 6

	R_w	$L_{n,w}$	$L_{n,w}$ com tapete	ΔL do tapete
Solução existente	49	68	64	4
Solução 4	54	55	55	0
Solução 5	54	58	59	-1
Solução 6	54	58	59	-1

Aplicando a metodologia teórica baseada em Sharp, Cremer e Fahy (ver Fig.8.26.) conclui-se que os espectros mais uma vez não coincidem, possivelmente devido à incapacidade de ensaiar um pavimento próximo da solução real. No entanto, os valores de redução sonora R_w são próximos dos obtidos nos ensaios laboratoriais, a diferença é de 5dB. Acontece também que a frequência crítica no modelo teórico está em frequências mais baixas devido à frequência crítica das vigas, e a existência dos picos mínimos nas frequências próximas dos 200Hz nos gráficos da solução 4, 5 e 6, que se explica pelo facto de a frequência de ressonância das vigas com o soalho e dos painéis compósitos de madeira e cimento se encontrar entre os 190-250 Hz.

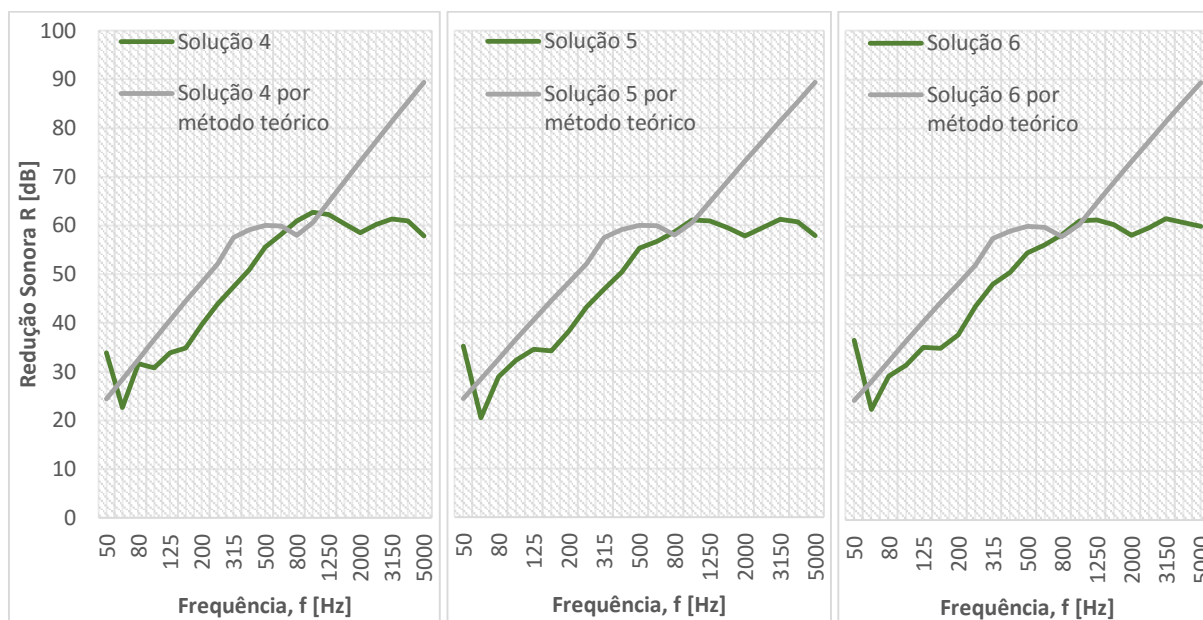


Fig. 8.26. – Gráficos de comparação entre espectros da redução sonora das soluções 4, 5 e 6 obtidos em laboratório e pelo modelo teórico, em bandas de 1/3 de oitava

Tabela 8.22. – Valor dos índices R_w resultantes dos ensaios laboratoriais e por modelo teórico às soluções 4, 5 e 6, e a diferença entre estes

	Solução 4	Solução 5	Solução 6
Ensaio de laboratório	54dB	54dB	54dB
Modelo teórico	61dB	61dB	61dB
Diferença	+5dB	+5dB	+5dB

8.3. PAREDES INTERIORES

A parede interior típica do Porto burguês, a solução existente de parede interior, é uma parede simples com um índice de redução sonora R_w de 39 dB (ver capítulo 7.3.). As novas soluções aqui propostas têm como objetivo a reabilitação acústica da solução existente com base na introdução de painéis compósitos de madeira e cimento. Além destes, são juntamente inseridos outros materiais de utilizados no isolamento acústico a fim de aumentar a capacidade de isolamento destas novas soluções, havendo assim um conjunto maior de novas possibilidades de reabilitação de paredes interiores.

Os painéis compósitos de madeira e cimento são painéis de 12mm de espessura. A densidade e o módulo de elasticidade em flexão (módulo de Young) que se escolheu foram os dos painéis Viroc [27]. O fator de perdas definido foi retirado das propriedades básicas dos painéis compósitos de madeira e cimento da empresa Cetris [31], cujo produto é muito semelhante aos painéis Viroc ao nível das propriedades acústicas, dimensões e composição, e que não diverge muito do valor 0,01 indicado pelo livro “*Engineering Noise Control*” [43] para painéis de partículas.

Tabela 8.23. – Propriedades do painel compósito de madeira e cimento

Painel compósito de madeira e cimento	Densidade	Módulo de Young	Fator de perdas
	1350 kg/m ³	4,5 GPa	0,013

A metodologia baseada em Sharp, Cremer e Fahy para painéis simples (ver capítulo 5.2.1.) prevê um índice de redução sonora R_w para o painel compósito de madeira e cimento de 32dB e o gráfico de redução sonora por bandas de 1/3 oitava de frequência representado na Fig.8.27. A frequência crítica dos painéis encontra-se nos 3150Hz, valor característico destes painéis, obtido quer segundo a metodologia teórica baseada em Sharp, Cremer e Fahy ou baseada nas expressões do livro “*Engineering Noise Control*”.

Apenas para comparação, os painéis Viroc e os painéis compósitos de madeira e cimento da Cetris têm um índice R_w de 33dB e 31dB, respetivamente, para espessuras de 12mm. Aplicando a metodologia teórica de caracterização e utilizando os dados retirados dos painéis fabricados por estas duas empresas é obtido um índice de redução e um espectro de redução sonora por bandas de oitava de frequência que não se afastam muito dos dados associados aos painéis destas empresas, o que ajuda a uma boa previsão do isolamento sonoro das novas soluções.

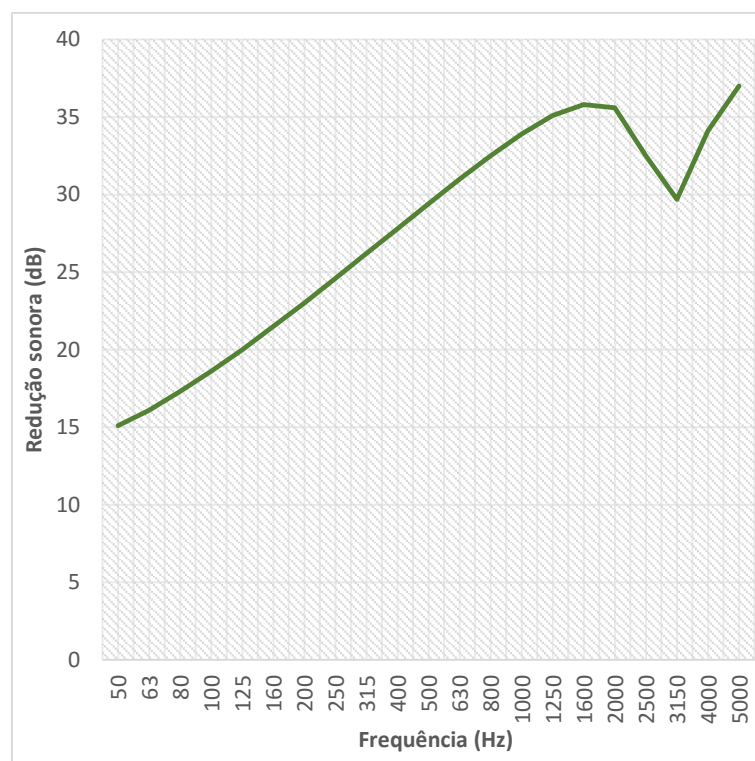


Fig. 8.27. – Espectro da redução sonora do painel compósito de madeira e cimento

Tabela 8.24. - Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} do painel compósito de madeira e cimento

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	R_w (dB)	C	C_{tr}
R (dB)	16	20	24	29	34	34	33	32	-1	-3

A camada de lã de rocha que será utilizada corresponde a 70mm de lã de rocha com 60kg/m^3 de densidade, 24000 Pa.s/m^2 de resistência ao fluxo de ar (AF) e 0,009 de fator de perdas. As propriedades da madeira de pinho e do revestimento são as mesmas das apresentadas no capítulo 7.2.

Tabela 8.25. – Propriedades da lã de rocha

Lã de rocha	Densidade	AF	Fator de perdas
	60 kg/m^3	24000 Pa.s/m^2	0,009

Tabela 8.26. – Propriedades do revestimento em gesso

Revestimento em gesso	Densidade	Módulo de Young	Fator de perdas
	710 kg/m^3	2 GPa	0,009

Tabela 8.27. – Propriedades da madeira de pinho

Madeira de pinho	Densidade	Módulo de Young	Fator de perdas
	490 kg/m^3	5 GPa	0,04

8.3.1. SOLUÇÃO 1

A solução 1 consiste na introdução de painéis compostos de madeira e cimento em ambas as faces da solução existente sob a camada de revestimento.

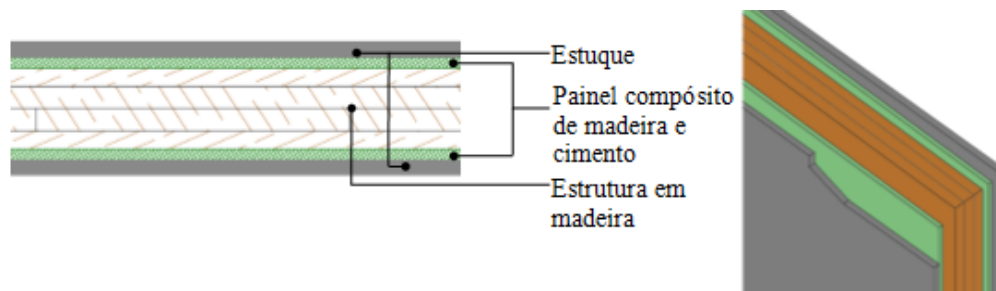


Fig. 8.28. –Esquema da solução 1 de parede interior (corte horizontal) e modelo em 3D

O índice de redução sonora R_w da solução 1 é 42 dB. Os painéis compostos conferem um incremento na redução sonora de mais 3dB na solução existente. O gráfico da Fig.8.29. apresenta as reduções sonoras para cada banda de 1/3 de oitava da solução existente e da solução 1 e a Tabela 8.28.as reduções sonoras para cada banda de oitava da solução 1. No gráfico compara-se igualmente os espectros da solução existente e da solução 1 e comprova-se que esta nova solução é melhor em todas as frequências do intervalo dos 50 aos 5000Hz. A frequência de ressonância do conjunto está nos 315Hz e a frequência crítica mantém-se nos 3150Hz. Há um melhor desempenho nas baixas frequências (+3 a +7 dB que a solução existente) e um incremento satisfatório nas médias e altas frequências (+1 a +3dB que a solução existente).

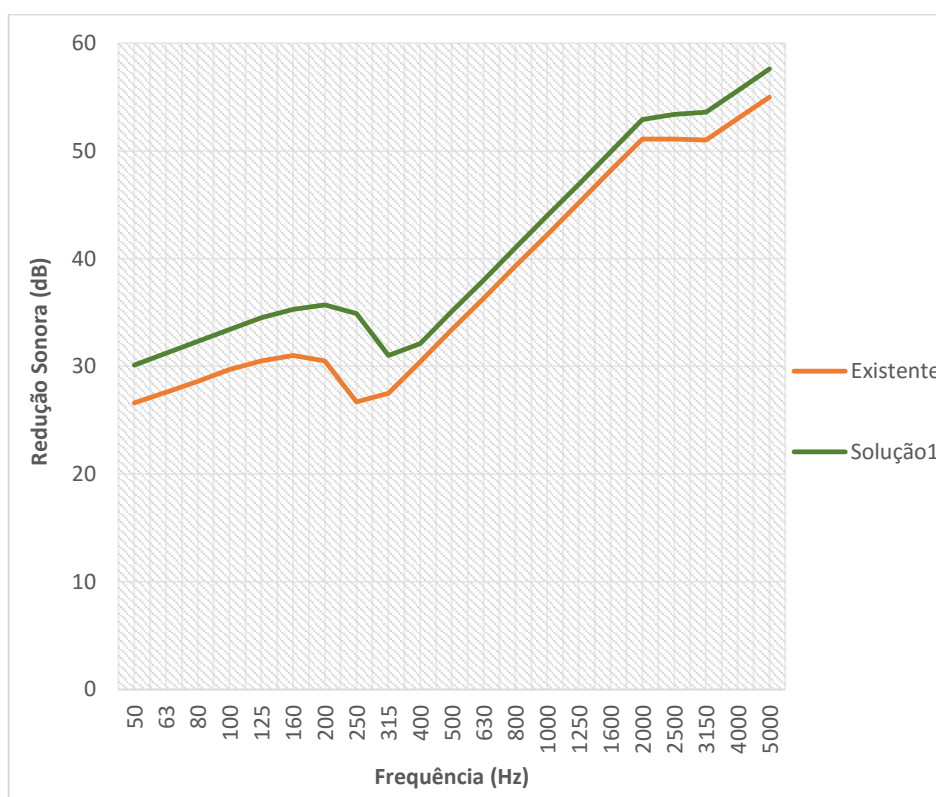


Fig. 8.29. – Espectros da redução sonora da solução 1 e da solução existente de parede interior por bandas de 1/3 de oitava

Tabela 8.28. - Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 1

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	R_w (dB)	C	C_{tr}
R (dB)	31	34	33	34	43	52	55	42	-1	-4

8.3.2. SOLUÇÃO 2

Esta solução resume-se na duplicação do número de painéis compósitos de madeira e cimento introduzidos em ambas as faces da parede existente sob o revestimento.

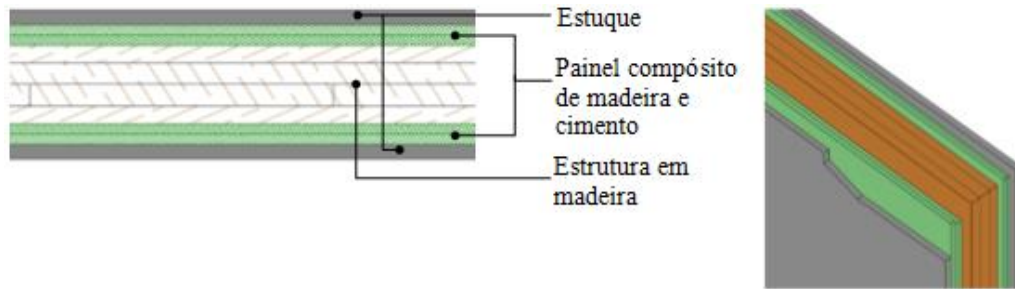


Fig. 8.30. –Esquema da solução 2 de parede interior (corte horizontal) e modelo em 3D

A duplicação do número de painéis faz com que a redução sonora da parede aumente para os 44dB, mais 2dB em relação à mesma solução com apenas um painel compósito em cada face, a solução 1. Os valores da redução sonora são superiores em todas as frequências comparativamente à solução 1.

Confrontando com a solução existente (Fig.8.31), a relação entre espectros é semelhante ao já visto para o caso da solução 1, contudo a diferença entre estas curvas é um pouco maior. A solução 2 apresenta um índice de redução sonora R_w 5dB superior à solução existente.

Tabela 8.29. - Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 2

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	R_w (dB)	C	C_{tr}
R (dB)	34	37	38	36	45	53	57	44	-1	-3

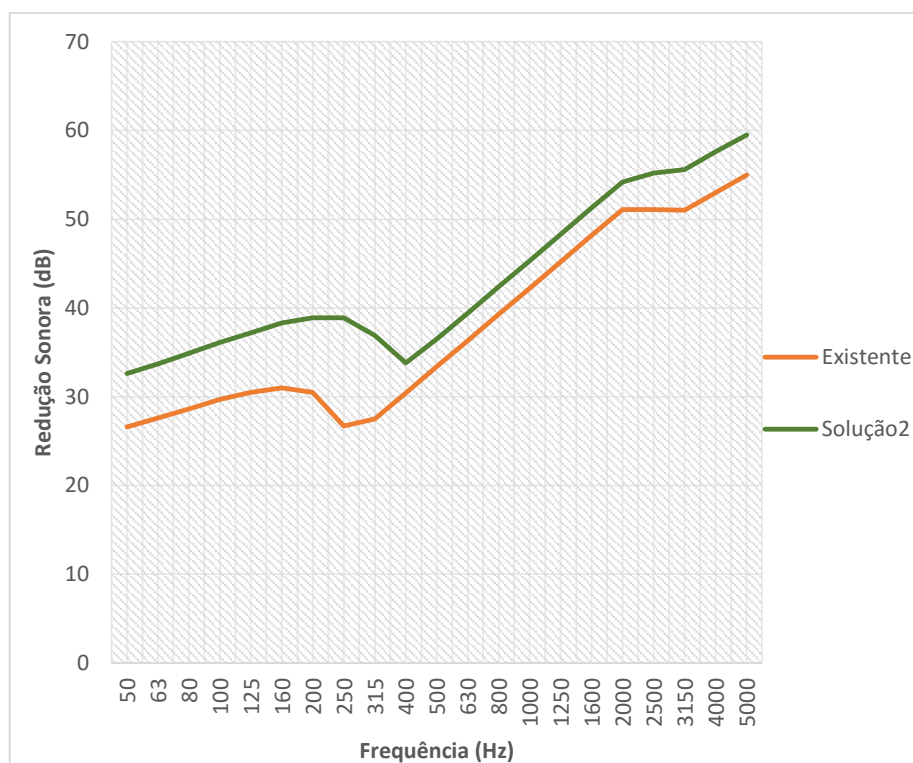


Fig. 8.31. – Espectros da redução sonora da solução 2 e da solução existente de parede interior por bandas de 1/3 de oitava

8.3.3. SOLUÇÃO 3

A solução 3 resulta da transformação da parede da solução 1 numa parede dupla onde na caixa de ar de 90mm se insere 70mm de uma camada de lã de rocha, com o intuito de avaliar o benefício que esta camada acrescenta juntamente com os painéis compósitos à parede existente. Os elementos que estabelecem o espaçamento da caixa de ar são espaçadores de madeira (100x50mm) afastados de 500mm entre si.

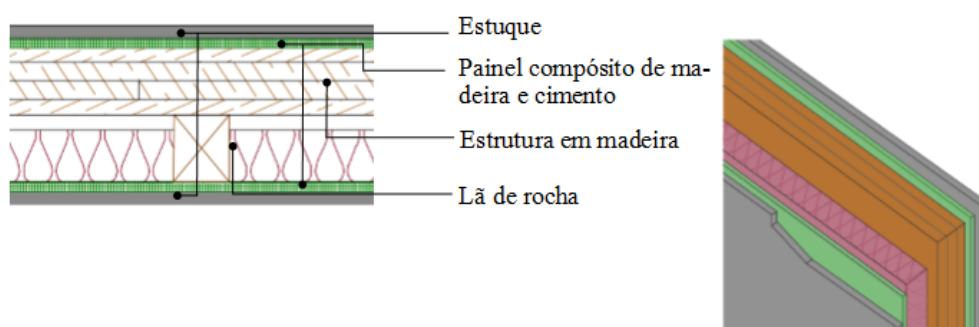


Fig. 8.32. – Esquema da solução 3 de parede interior (corte horizontal) e modelo em 3D

A introdução dos painéis compósitos de madeira e cimento e a caixa de ar parcialmente preenchida pela lã de rocha resulta num acréscimo de 5dB no R_w em relação à parede existente. Comparativamente com a parede da solução 1 esta nova solução consegue um acréscimo de 2dB.

O índice R_w é igual à solução 2, que apenas introduz 4 camadas de painéis compósitos de madeira e cimento na solução existente, contudo tem um desempenho nas médias e altas frequências melhor que a solução existente (ver Fig.8.33.) e a solução 1 e 2. Nas baixas frequências não há incremento, possivelmente devido à caixa de ar e à conexão entre panos. Até aos 160Hz a redução sonora é menor (entre -1dB e -5dB) atingindo o pico mais baixo nos 100Hz (-12dB) em comparação com a solução existente. A partir dos 160Hz os valores da redução são muito melhores, com valores de redução sonora com +3 até +23dB que a solução existente.

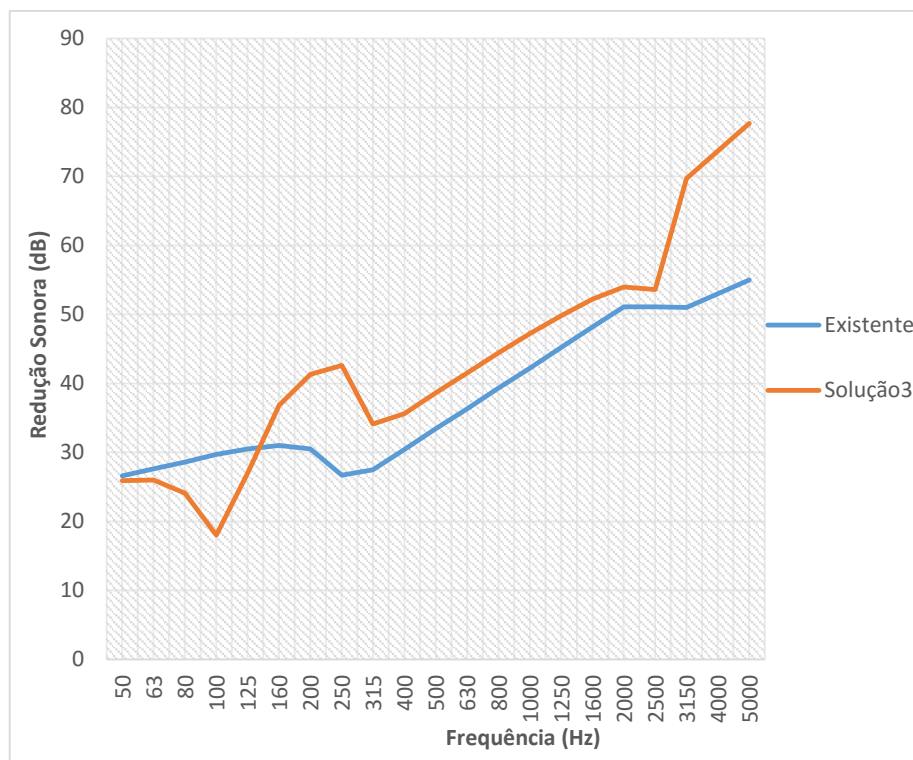


Fig. 8.33. – Espectros da redução sonora da solução 3 e da solução existente de parede interior por bandas de 1/3 de oitava

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	R_w (dB)	C	C_{tr}
R (dB)	25	22	38	38	47	53	73	44	-2	-8

8.3.4. SOLUÇÃO 4

Esta solução é muito semelhante à solução 3 com a única diferença no tipo de espaçadores colocados na caixa de ar. Os espaçadores nesta solução são espaçadores de aço de 0,55mm e têm como finalidade corrigir o mau desempenho nas baixas frequências observado na solução 3. Como previsto, o espectro é semelhante, principalmente acima dos 200Hz, mas o desempenho na redução sonora é melhor uma vez que os espaçadores de aço conseguem uma ligação menos rígida. Estes espaçadores podem ter a forma de um C ou Z.

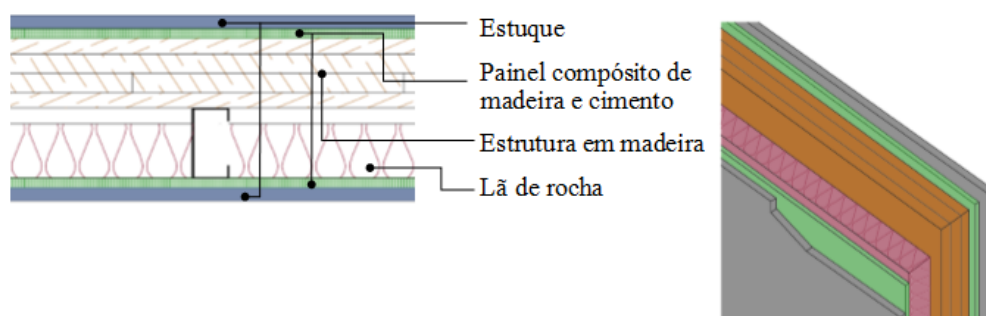


Fig. 8.34. – Esquema da solução 4 de parede interior (corte horizontal) e modelo em 3D

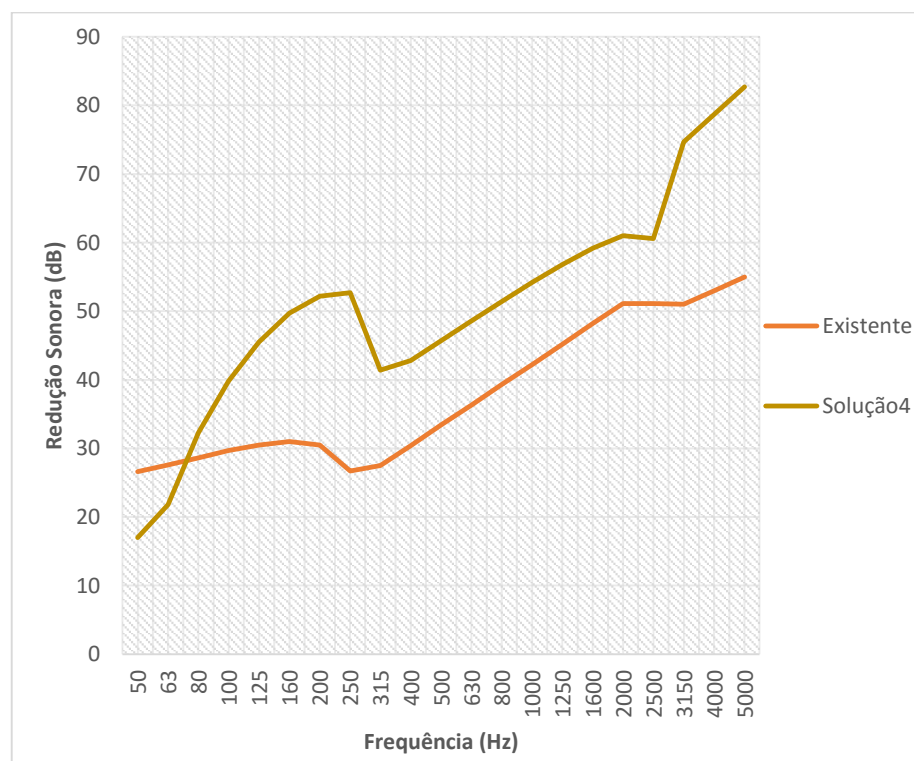


Fig. 8.35. – Espectros da redução sonora da solução 4 e da solução existente de parede interior por bandas de 1/3 de oitava

Tabela 8.31. - Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 4

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	R_w (dB)	C	C_{tr}
R (dB)	20	43	46	45	54	60	78	52	-1	-3

Esta solução apresenta um índice de redução sonora de 52dB. Comparativamente com a solução existente (ver Fig.8.35.) esta solução apresenta um bom desempenho no isolamento a sons aéreos, no intervalo de frequências dos 80 aos 5000Hz, aproximadamente, com aumentos entre +4 a +25 dB que a solução existente. Nas frequências mais baixas continua a ser onde a solução apresenta pior resultados de redução sonora (menos 10 dB que a solução existente nos 50Hz).

O facto de os espaçadores fazerem uma ligação com menor área de contacto entre os dois panos em relação aos espaçadores de madeira resulta num acréscimo de desempenho na redução sonora em praticamente todo o intervalo de frequências em estudo, como se pode observar comparando as Tabelas 8.30. e 8.31 e pela Fig.8.36.

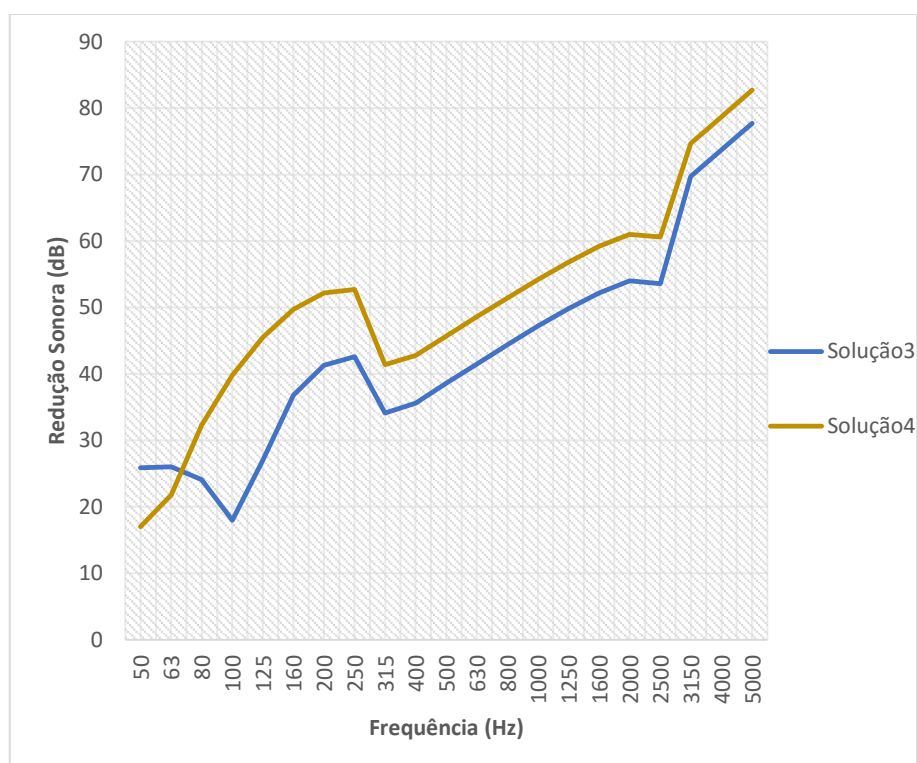


Fig. 8.36. – Espetros da redução sonora da solução 4 e da solução 3 de parede interior por bandas de 1/3 de oitava

8.3.5. SÍNTESE DE RESULTADOS

A Tabela 8.32. apresenta os índices de redução sonora da solução existente e das várias soluções de reabilitação acústica da parede interior típica da casa clássica do Porto burguês.

Tabela 8.32. – Tabela resumo dos índices de redução sonora da solução existente e das soluções 1, 2, 3 e 4 de reabilitação acústica de paredes interiores

	R_w
Solução existente	39dB
Solução 1	42dB
Solução 2	44dB
Solução 3	44dB
Solução 4	52dB

8.4. COBERTURAS

Nas soluções típicas de coberturas do Porto burguês é característico encontrar as coberturas inclinadas, que estão em contacto com o exterior, e no último piso da casa é possível existir um teto, criando um desvão.

As características dos materiais utilizados na aplicação da metodologia de previsão do isolamento sonora a sons de condução aérea baseada em Sharp, Cremer e Fahy (capítulo 5.3.1.) são as apresentadas no capítulo 8.3. para as paredes interiores e no capítulo 7.4. para a caracterização da cobertura existente.

A reabilitação acústica das coberturas divide-se em soluções de reabilitação acústica de:

- coberturas inclinadas: referente à solução construtiva apoiada pela perna (asna);
- laje de esteira: referente à solução construtiva horizontal apoiada pela linha (asna).

Esta distinção possibilita dois tipos de intervenção uma vez que na cobertura, tal como referido no capítulo 4.2.5, é possível existir uma laje de esteira. Se o desvão for útil a reabilitação acústica passa por soluções de pavimentos apresentadas no capítulo 7.2.

8.4.1. COBERTURAS INCLINADAS

A solução existente de cobertura inclinada tem um índice de redução sonora R_w de 39dB. As duas propostas de soluções de reabilitação apresentadas a seguir são à base dos painéis compósitos de madeira e cimento, descritos com mais detalhe no capítulo 7.3., e recorrem igualmente ao material isolante acústico, a lã de rocha, para obter uma solução um pouco mais elaborada e melhor isolante.

8.4.1.1. Solução 1

A solução 1 é a solução de reabilitação acústica onde se introduz painéis compósitos de madeira e cimento sob as tábuas de forro e apoiados nas madres.

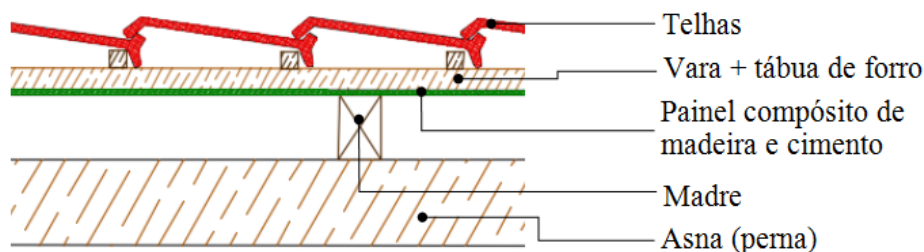


Fig. 8.37. – Esquema da solução 1 de cobertura inclinada (corte transversal) e legenda

Colocados sob as tábuas de forro e apoiados pelas madres, estes painéis conferem à nova solução um índice de redução sonora R_w de 41dB. As frequências crítica e de ressonância encontram-se, tal como na solução existente e na maioria das soluções já neste trabalho apresentadas, nos 3150Hz e nos 250Hz, respetivamente.

Comparativamente com o mesmo índice R_w da solução existente, há um ganho de 2dB no isolamento sonoro. O gráfico da Fig.8.38. apresenta as duas curvas da redução sonora da solução 1 e da solução existente por frequência e constata-se que esta nova solução é melhor em todas as frequências.

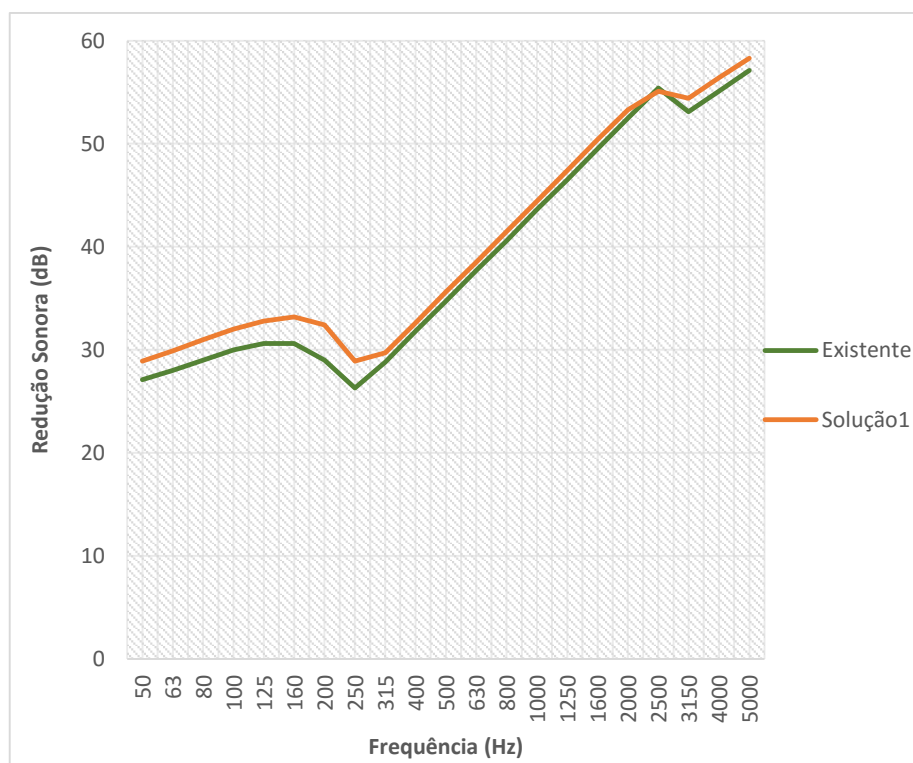


Fig. 8.38. – Espectros da redução sonora da solução 1 e da solução existente de cobertura inclinada por bandas de 1/3 de oitava

Tabela 8.33. - Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 1

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	R_w (dB)	C	C_{tr}
R (dB)	30	33	30	35	44	52	56	41	-1	-3

8.4.1.2. Solução 2

A segunda solução de reabilitação acústica da cobertura inclinada existente difere da primeira solução na medida em que além dos painéis compósitos sob as tábuas de forro é inserida, entre as madres, uma camada de 7cm de lã de rocha.

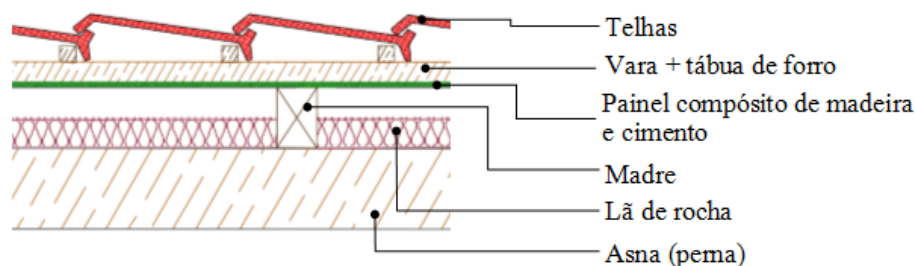


Fig. 8.39. – Esquema da solução 2 de cobertura inclinada (corte transversal) e legenda

Esta solução 2 tem um índice de redução sonora R_w de 56dB, ou seja, 17db mais que a solução existente de cobertura inclinada. A introdução da lã de rocha, como era esperado, incrementa a redução sonora da solução em todas as frequências, exceto nas frequências mais baixas onde a redução sonora chega a ser menor que na solução existente, menos 4dB nos 50Hz, como se pode observar no gráfico da Fig. 8.40.

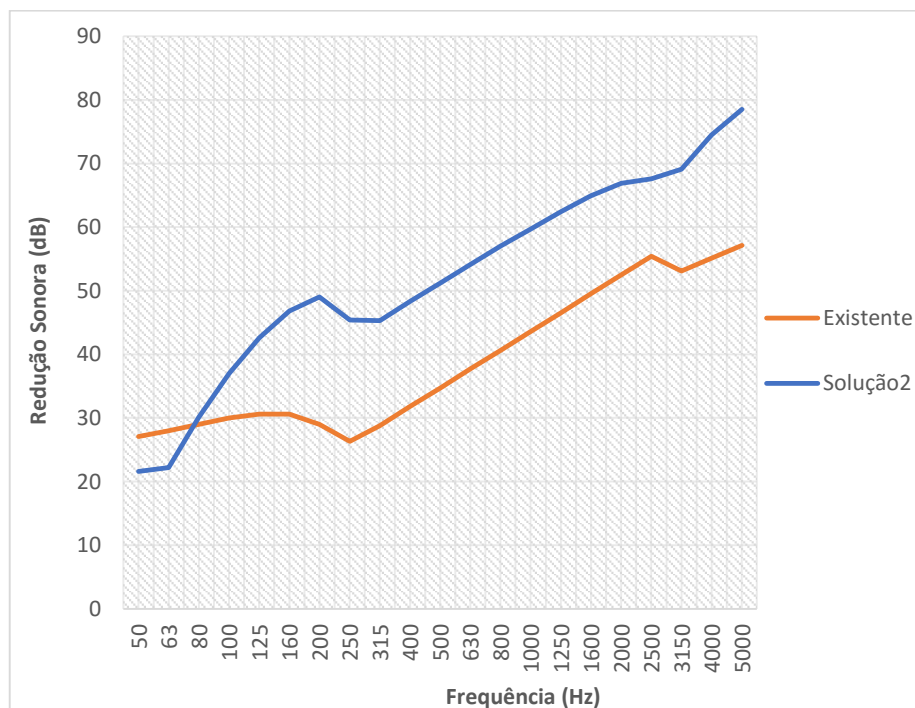


Fig. 8.40. – Espectros da redução sonora da solução 2 e da solução existente de cobertura inclinada por bandas de 1/3 de oitava

Tabela 8.34. - Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 2

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	R_w (dB)	C	C_{tr}
R (dB)	23	40	46	51	59	66	72	56	-1	-5

8.4.2. LAJES DE ESTEIRA

As lajes de esteira, soluções construtivas algo semelhante aos pavimentos, apresentam um índice de redução sonora de 35dB. As duas soluções a seguir descritas seguem o mesmo processo de intervenção que a utilizada nas coberturas inclinadas. A primeira com a simples introdução de painéis compósitos de madeira e cimento e a segunda solução com os painéis e uma camada de lã de rocha. Outras soluções poderiam ser apresentadas, inclusive soluções que contabilizassem o facto de o desvão ser útil e, consequentemente, a necessidade de isolamento a sons de percussão, porém essas soluções são semelhantes às soluções apresentadas para os pavimentos (capítulo 8.1.).

8.4.2.1. Solução 1

A primeira solução de reabilitação acústica da laje de esteira existente consiste na colocação de painéis compósitos de madeira e cimento sobre os barrotes. Nas zonas onde ocorrem as linhas das asnas introdução de painéis compósitos não acontece.

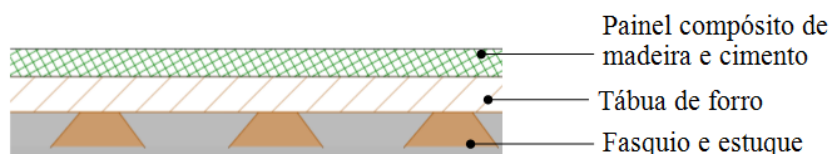


Fig. 8.41. – Esquema da solução 1 de laje de esteira (corte transversal) e legenda

Esta solução consegue um aumento da redução sonora em 2dB, a inserção dos painéis compósitos fez com que a solução obtivesse 37dB de redução sonora e a frequência crítica do conjunto encontra-se agora nos 800Hz, como se pode observar no gráfico da Fig.8.41.

A diferença entre a solução 1 e a solução existente (Fig.8.41.) não é significativamente grande, principalmente nas altas frequências. Até aos 800Hz, até à frequência crítica, é onde se nota a potencialidade que a simples introdução dos painéis tem nestas soluções.

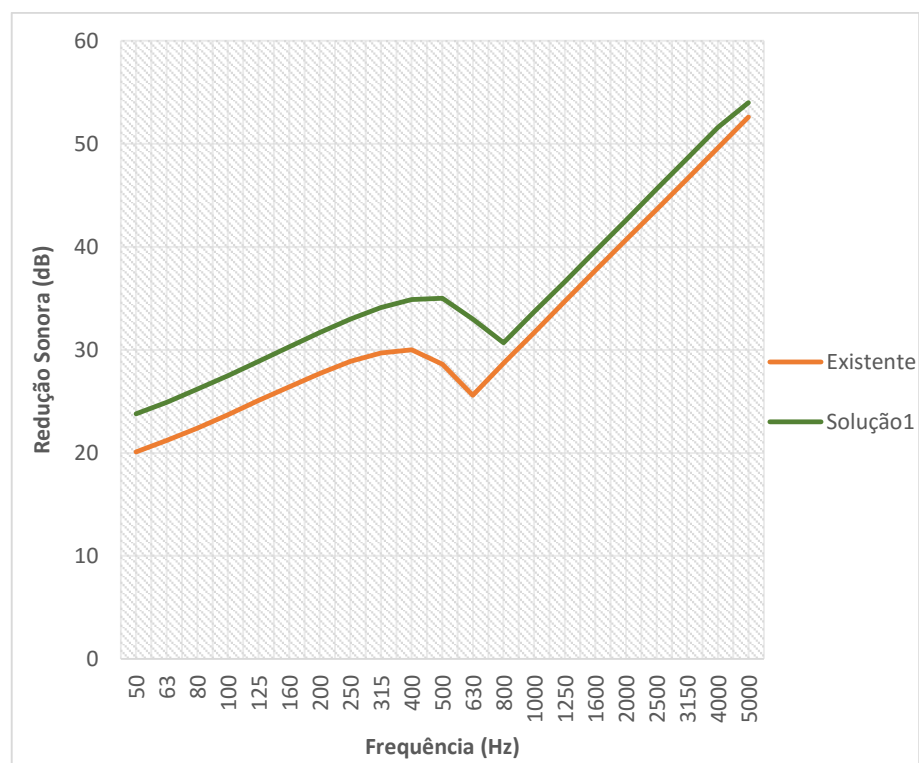


Fig. 8.42. – Espectros da redução sonora da solução 1 e da solução existente de laje de esteira por bandas de 1/3 de oitava

Tabela 8.35. - Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 1

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	R_w (dB)	C	C_{tr}
R (dB)	25	29	33	34	33	42	51	37	-1	-3

8.4.2.2. Solução 2

A solução 2 é uma solução de reabilitação semelhante à anterior, introdução de uma camada de painéis compósitos de madeira e cimento sobre as tábuas de forro e uma adicional camada de lã de rocha sobre estes painéis.

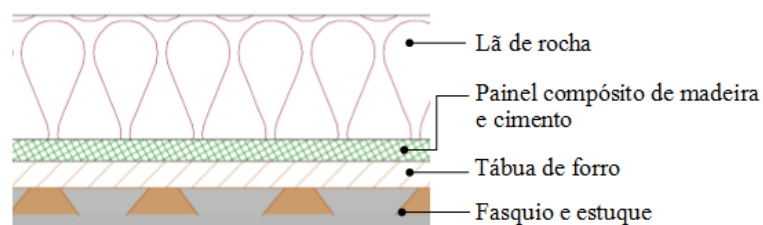


Fig. 8.43. – Esquema da solução 2 de laje de esteira (corte transversal) e legenda

Esta solução tem valores de redução sonora maiores em todas as frequências menos nas frequências mais baixas, abaixo dos 80Hz. O índice de redução sonora R_w da solução 2 de lajes de esteira é 52dB, substancialmente maior que na solução 1 devido à presença da camada de lã de rocha.

No gráfico da Fig. 8.43. é possível observar que a combinação dos painéis compósitos com a lã de rocha incrementa o desempenho da solução no isolamento sonoro a sons aéreos.

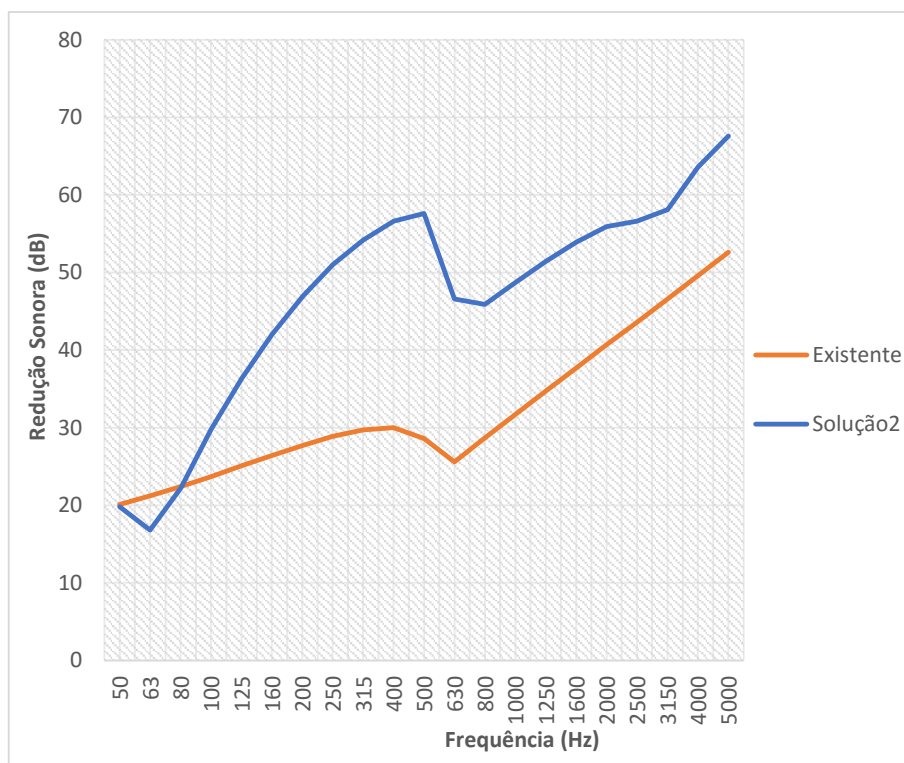


Fig. 8.44. – Espectros da redução sonora da solução 2 e da solução existente de laje de esteira

Tabela 8.36. - Redução sonora por bandas de oitava e R_w , C e C_{tr} da solução 2

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	R_w (dB)	C	C_{tr}
R (dB)	19	33	50	51	48	55	61	52	-3	-6

8.4.3. SÍNTESE DE RESULTADOS

A Tabela 8.37. e 8.38. apresentam os índices de redução sonora R_w das soluções existentes e de reabilitação acústica de coberturas inclinadas e de lajes de esteira.

Tabela 8.37. – Tabela resumo dos índices de redução sonora da solução existente e das soluções 1 e 2 de reabilitação acústica de coberturas inclinadas

	R_w
Solução existente	39dB
Solução 1	41dB
Solução 2	56dB

Tabela 8.38. – Tabela resumo dos índices de redução sonora da solução existente e das soluções 1 e 2 de reabilitação acústica de lajes de esteira

	R_w
Solução existente	35dB
Solução 1	37dB
Solução 2	52dB

9

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

9.1. CONCLUSÕES

A acústica é um fator decisivo na saúde e no conforto, a consciencialização por parte da população para tal é cada vez maior e as propriedades de isolamento sonoro são fundamentais para atingir a satisfação, o bem-estar e boa qualidade de vida nas habitações.

A melhoria do desempenho no isolamento sonoro das soluções construtivas da casa clássica do Porto burguês é realizada com base na introdução de painéis compósitos de madeira e cimento, materiais sustentáveis. Sustentáveis a nível económico e ecológico, permitindo a continuação da coexistência do setor da construção e da natureza e tendo em consideração os desafios financeiros que atualmente se enfrentam. A reabilitação acústica apoia-se na preservação dos elementos e materiais existentes nas soluções alvo de intervenção, soluções de pavimentos, paredes interiores e coberturas.

Ao longo deste trabalho é possível concluir que há potencialidade acústica na introdução de painéis compósitos de madeira e cimento nos vários tipos de soluções e que a combinação destes painéis compósitos com materiais resilientes e absorventes resulta numa variedade de soluções de reabilitação com os seus diferentes desempenhos.

As conclusões são apresentadas nos capítulos 9.1.1., 9.1.2. e 9.1.3., correspondentes às soluções de reabilitação acústica de pavimentos, paredes interiores e coberturas, respetivamente, soluções estas à base de painéis compósitos de madeira e cimento.

A caracterização acústica de soluções de pavimentos é uma caracterização mais detalhada uma vez que foi possível realizar ensaios laboratoriais de caracterização do isolamento sonoro tanto a sons aéreos como de percussão, a determinação da eficácia de um revestimento resiliente, o tapete, no isolamento a sons de percussão e a comparação dos resultados das reduções sonoras obtidas em laboratório com as reduções sonoras obtidas por modelação teórica. Nas restantes soluções de paredes interiores e coberturas, a caracterização baseou-se apenas na aplicação do modelo teórico.

9.1.1. CONCLUSÕES RELATIVAS ÀS SOLUÇÕES DE PAVIMENTOS

9.1.1.1. Pavimentos sem teto

As soluções de reabilitação acústica de pavimentos sem teto são soluções que à solução existente é introduzida uma camada de painéis compósitos de madeira e cimento juntamente com: uma camada resiliente de Aglomex 90FR entre os painéis compósitos e o soalho (solução 1), uma camada resiliente em geotêxtil entre os painéis compósitos e o soalho (solução 2) ou a camada resiliente de Aglomex 90FR e apoios resilientes sobre as vigas em Aglomex 200FR (solução 3).

As reduções sonoras destas três soluções de reabilitação acústica à base de painéis compósitos de madeira e cimento resultantes do tratamento dos dados, obtidos dos ensaios de isolamento a sons de condução aérea descritos no capítulo 6, revelam que quando se existe um benefício no isolamento sonoro de mais 10dB, aproximadamente, em relação à solução existente, valor consideravelmente satisfatório. Os espectros de redução sonora por frequência das três soluções de reabilitação são muito similares, com poucas divergências (ver Fig. 9.3.), demonstrando que o material que compõe a camada resiliente em pouco influencia o isolamento, estando a potencialidade, na sua maioria, nos painéis compósitos de madeira e cimento. Na solução 3 entre os 800 e os 5000Hz existe um desempenho um pouco superior, evidenciando a pouca influência dos apoios resilientes no isolamento sonoro a sons aéreos.

Os índices de isolamento a sons de percussão obtidos dos ensaios laboratoriais às três soluções de reabilitação acústica à base de painéis compósitos de madeira e cimento (ver Fig. 9.4.) revelam que a colocação de um tapete incrementa em todas as soluções o isolamento a sons de percussão e que a introdução de apoios resilientes reduz o nível de pressão sonora em quase todas as frequências, demonstrando, como espectável, que o verdadeiro potencial dos apoios resilientes está no isolamento a sons de percussão.

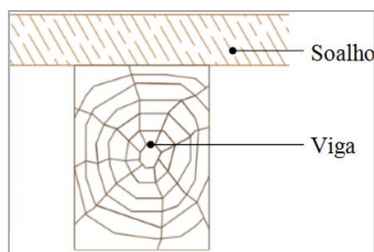


Fig. 9.1. – Esquema da solução de pavimento existente sem teto

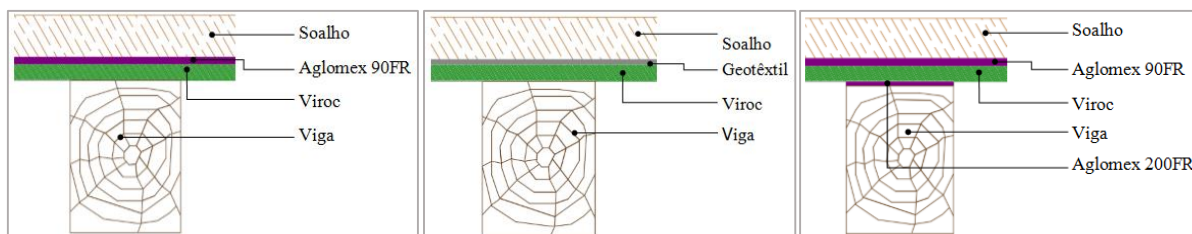


Fig. 9.2. – Esquemas das três soluções de reabilitação de pavimentos sem teto (solução 1, 2 e 3)

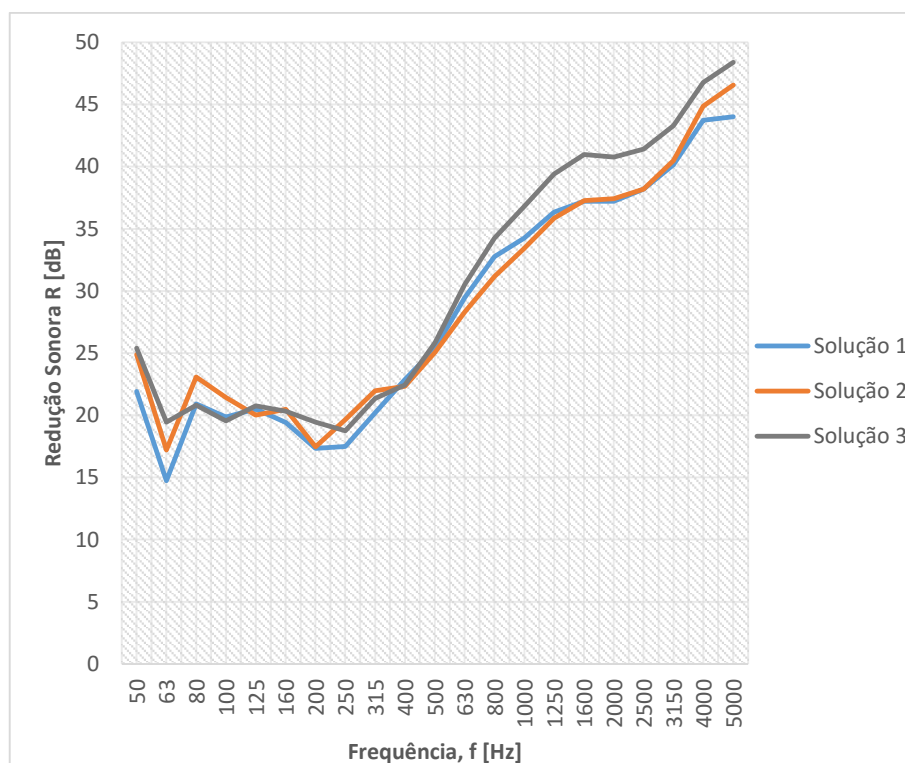


Fig. 9.3. – Espectros da redução sonora das soluções 1, 2 e 3 em bandas de 1/3 de oitava

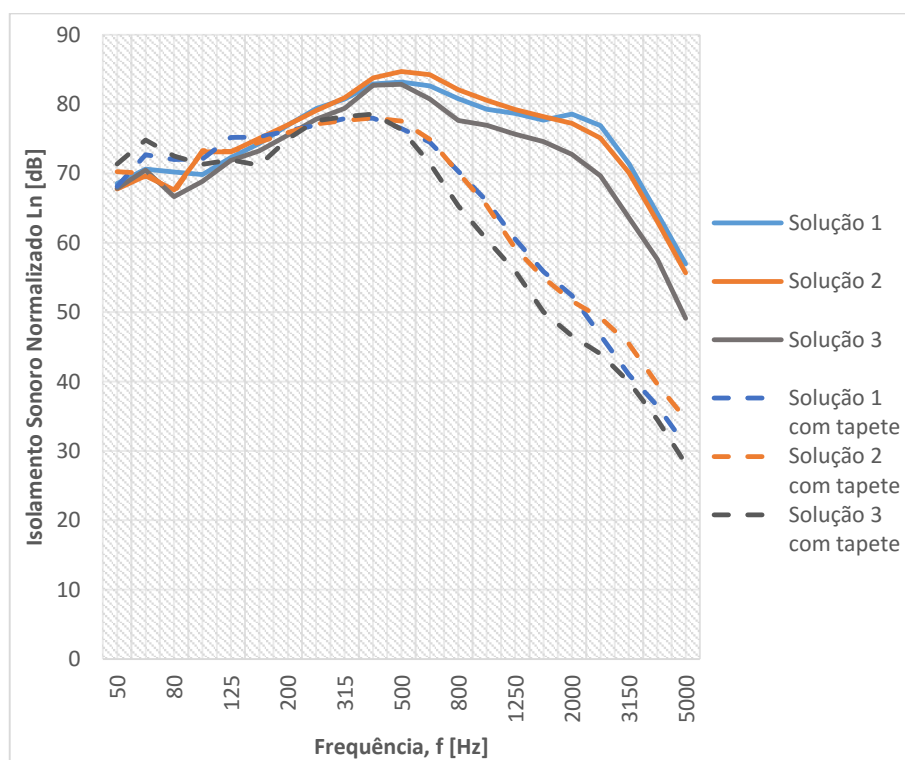


Fig. 9.4. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão das soluções 1, 2 e 3 sem e com tapete

9.1.1.2. Pavimentos com teto

As três soluções de reabilitação acústica de pavimentos com teto são soluções onde são introduzidos na solução existente painéis compósitos de madeira e cimento e uma camada de lã de rocha, a preencher parcialmente a caixa de ar, combinados com: uma camada resiliente em Aglomex 90FR entre os painéis compósitos e o soalho e um apoio resiliente em Aglomex 200FR (solução 4), somente a camada de Aglomex 90FR (solução 5) ou somente a camada resiliente, mas em geotêxtil (solução 6).

As conclusões que se fazem entre as reduções sonoras resultantes dos ensaios laboratoriais às três soluções reabilitadas com teto (ver Fig. 9.7.) são relativamente as mesmas que se fizeram para as soluções reabilitadas de pavimentos sem teto. Verifica-se uma similaridade entre os três espectros das soluções com teto. O espectro da solução 4 apenas se destaca com valores um pouco superiores a partir dos 200 Hz.

Os índices de isolamento a sons de percussão obtidos dos ensaios laboratoriais às três soluções de reabilitação acústica de pavimentos com teto (ver Fig. 9.8.) revelam que a colocação de um tapete não incrementa o isolamento a sons de percussão nas soluções 5 e 6, apenas na solução 4, que é a única das três com apoios resilientes nas vigas. Portanto, é possível admitir que as camadas resilientes em Aglomex ou geotêxtil têm um desempenho semelhante e que a introdução de apoios resilientes reduz o nível de pressão sonora em quase todas as frequências, permitindo que o tapete apresenta uma boa eficácia no isolamento sonoro a sons de percussão. Em suma, a solução 4 é a melhor solução de reabilitação acústica, no que diz respeito ao desempenho no isolamento a sons de percussão.

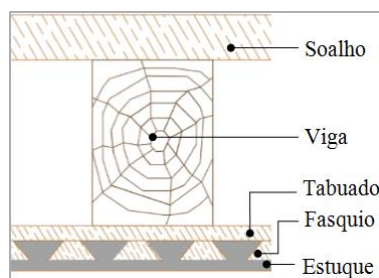


Fig. 9.5. – Esquema da solução de pavimento existente com teto

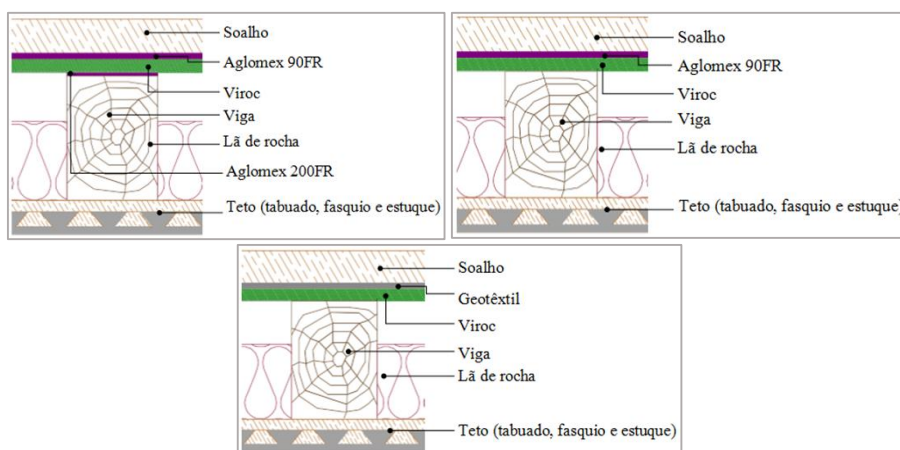


Fig. 9.6. – Esquemas das três soluções de reabilitação de pavimentos com teto (solução 4, 5 e 6)

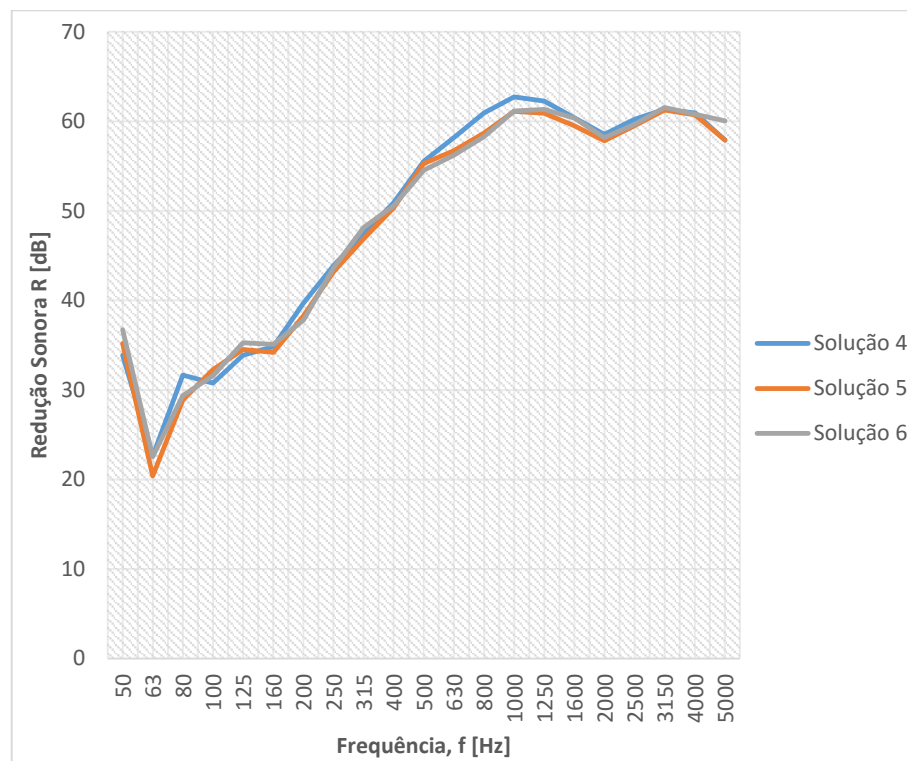


Fig. 9.7. – Espetros da redução sonora das soluções 4, 5 e 6 em bandas de 1/3 de oitava

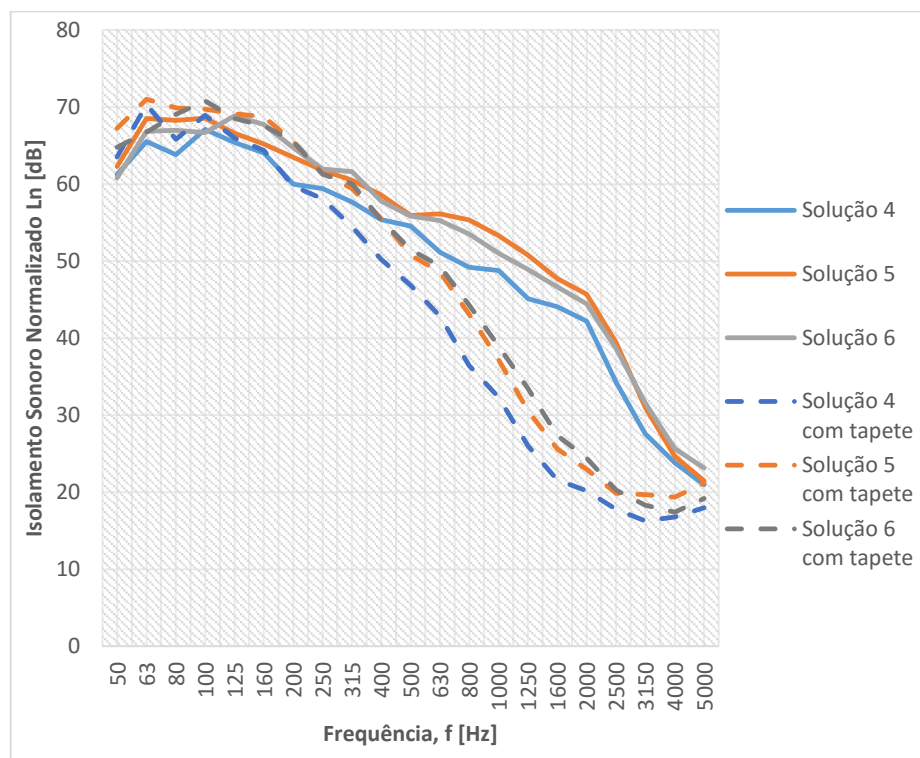


Fig. 9.8. – Espetros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão das soluções 4, 5 e 6 sem e com tapete

9.1.2. CONCLUSÕES RELATIVAS ÀS SOLUÇÕES DE PAREDES INTERIORES

A parede interior típica do Porto burguês tem um índice de redução sonora R_w de 39dB. Aplicando a metodologia baseada em Sharp, Cremer e Fahy verifica-se que simples introdução de painéis compósitos de madeira e cimento em ambas as faces da parede, a solução 1, aumenta a redução em 3dB, ou seja, os painéis compósitos de madeira e cimento têm a potencialidade, quando aplicados nas paredes interiores, de aumentar o isolamento a sons aéreos em 3dB. Caso se opte por inserir quatro camadas de painéis compósitos, duas camadas em cada face, o aumento passa a ser de 5dB face à solução existente, mais 2dB que a solução 1.

Quando se instala uma caixa de ar e se passa de uma parede simples para uma parede dupla, o acréscimo é substancial. Juntamente com os painéis compósitos de madeira e cimento, a presença da camada de lã de rocha na caixa de ar aumenta o índice de redução sonora para valores de 44 e 52dB, respetivamente para o caso de espaçadores de madeira (solução 3) e espaçadores de aço (solução 4). A diferença entre estas duas últimas soluções está no tipo de ligação entre os panos da parede e a sua rigidez da ligação.

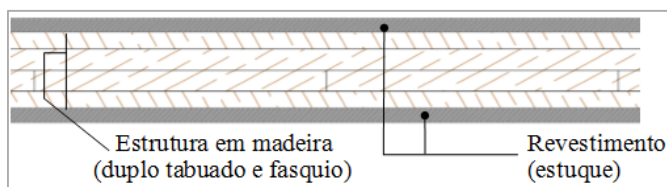


Fig. 9.9. – Esquema da solução de parede interior existente

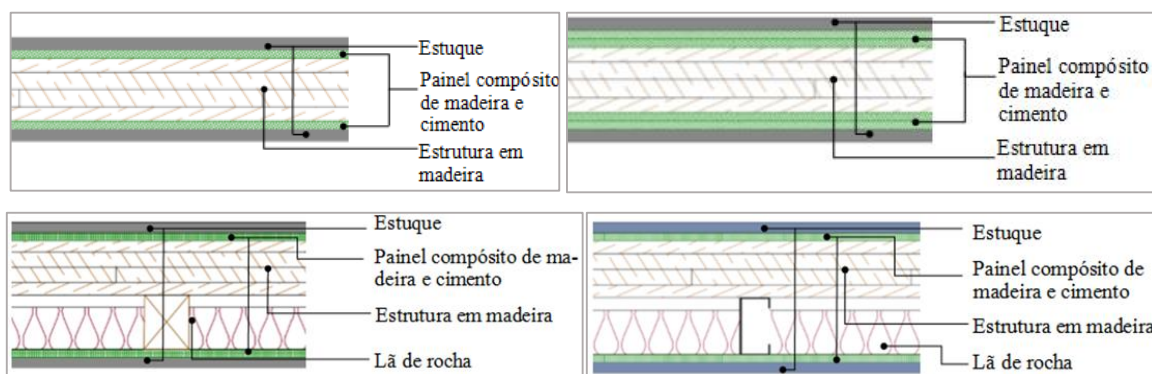


Fig. 9.10. – Esquemas das quatro soluções de reabilitação de paredes interiores (soluções 1 e 2 em cima, soluções 3 e 4 em baixo)

No gráfico da Fig. 9.11. estão os espectros de todas as soluções e conclui-se que as soluções 1 e 2 são soluções que aumentam uniformemente a redução sonora da parede. Num panorama geral, a solução 4 é a melhor solução pois é a que apresenta um melhor desempenho no isolamento a sons aéreos. Muitas outras variações de soluções com caixa de ar se poderiam futuramente fazer apenas mudando os espaçadores.

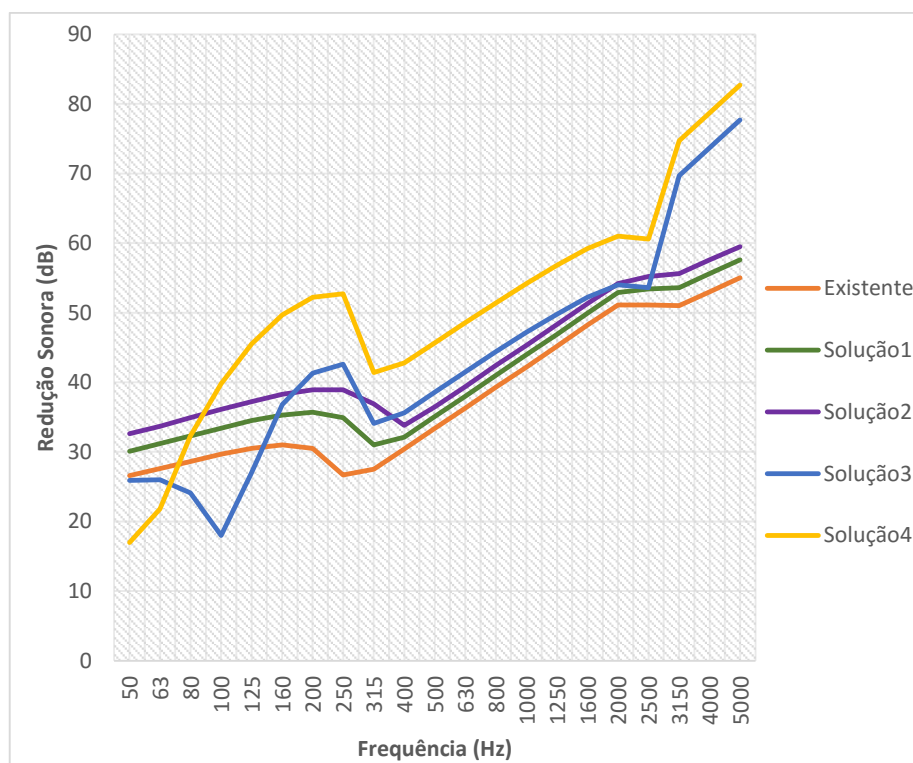


Fig. 9.11. – Espectros da redução sonora das soluções 1, 2, 3 e 4 e da solução existente de parede interior por bandas de 1/3 de oitava

Ao nível da análise do comportamento acústico, constata-se que a frequência crítica das soluções se mantém, aproximadamente, pelos 3150Hz, a frequência crítica dos painéis compósitos de madeira e cimento e da própria parede interior existente, e a frequência de ressonância em valores próximos dos 250Hz, frequência de ressonância observada também na parede interior existente. A solução 3 apresenta uma segunda frequência de ressonância nos 100Hz devido à caixa de ar e à ligação rígida entre os dois panos de parede.

9.1.3. CONCLUSÕES RELATIVAS ÀS SOLUÇÕES DE COBERTURAS

A reabilitação acústica das coberturas típicas do Porto burguês baseou-se no desenvolvimento de dois tipos de soluções de reabilitação para as coberturas inclinadas e para as lajes de esteira. O primeiro tipo de solução, as soluções 1, consiste na simples introdução de painéis compósitos de madeira e cimento nas soluções existentes, e o segundo tipo solução, as soluções 2, consiste em acrescentar à solução 1 uma camada de lã de rocha.

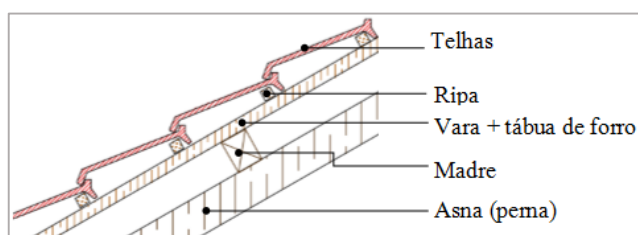


Fig. 9.12. – Esquema da solução de cobertura inclinada existente

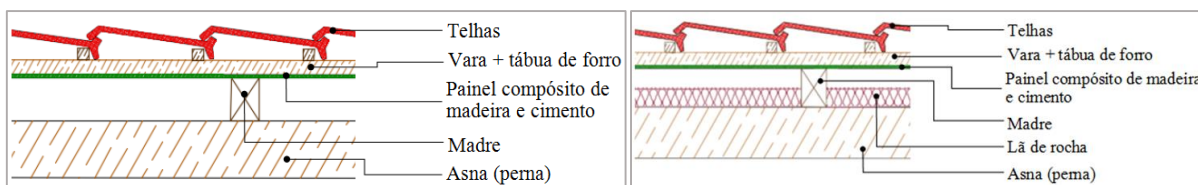


Fig. 9.13. – Esquemas das duas soluções de reabilitação de coberturas inclinadas (solução 1 e solução 2)

Nas coberturas inclinadas (Fig. 9.14.) constata-se que a solução 2 tem um melhor desempenho na redução sonora em grande parte do intervalo de frequências. Nas frequências mais baixas, abaixo dos 80Hz, tal como tem sido usual acontecer nas soluções construtivas que têm lã de rocha, é onde a diferença entre solução existente e solução 2 é desfavorável na reabilitação acústica.

Contudo, é possível verificar a potencialidade dos painéis compósitos uma vez que estes incrementam a redução sonora em todo o intervalo de frequências. O índice de redução sonora R_w aumenta em 2dB na solução 1 e 17dB quando acrescentada a camada de 7cm de lã de rocha, a solução 2.

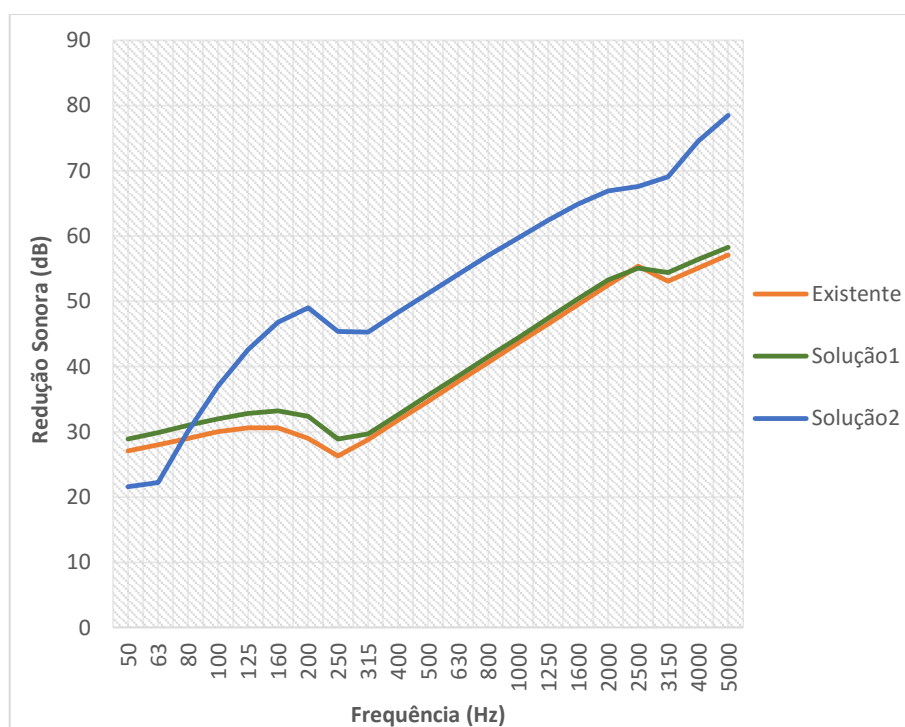


Fig. 9.14. – Espetros da redução sonora da solução 1, 2 e da solução existente de coberturas inclinadas por bandas de 1/3 de oitava

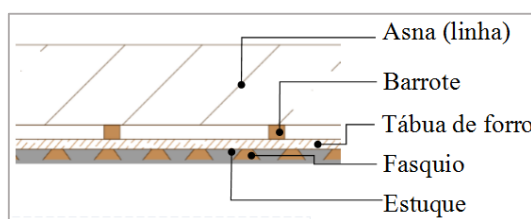


Fig. 9.15. – Esquema da solução de laje de esteira existente

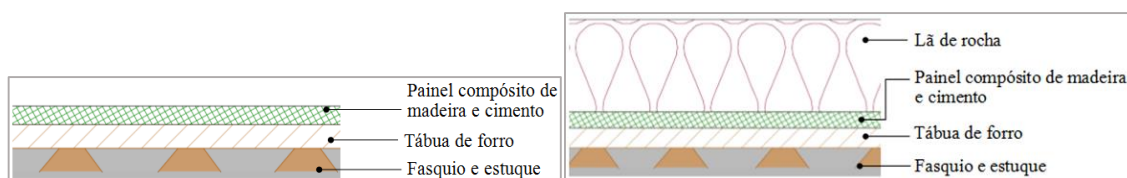


Fig. 9.16. - Esquemas das duas soluções de reabilitação de lajes de esteira (solução 1 e solução 2)

Quanto à reabilitação acústica das lajes de esteira (Fig.9.17.), o incremento no índice de redução sonora R_w nas duas soluções, que seguem o mesmo procedimento de intervenção que para o caso das soluções de coberturas inclinadas, é o mesmo que nestas soluções. A solução 1 tem mais 2dB que a solução existente e a solução 2 mais 17dB.

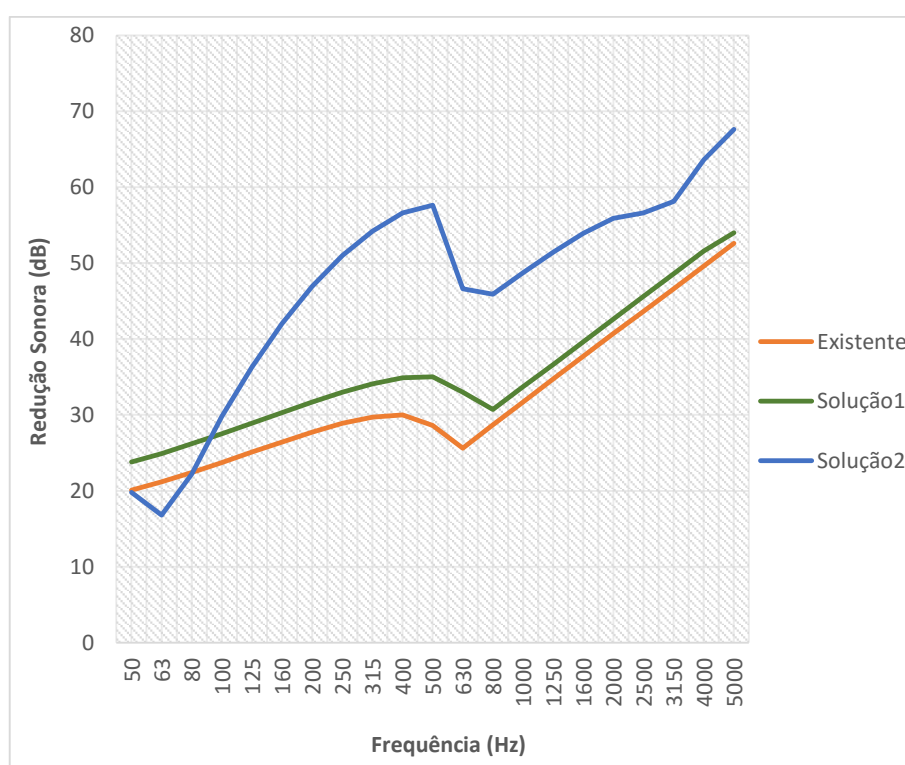


Fig. 9.17. – Espetros da redução sonora da solução 1, 2 e da solução existente de lajes de esteira por bandas de 1/3 de oitava

9.2. OUTRAS CONSIDERAÇÕES

No capítulo 6.3.1., na Tabela 6.1., há uma nota que refere que os ensaios de isolamento sonoro a sons de condução aérea correspondentes às soluções de reabilitação de pavimentos sem teto foram realizados com a fonte sonora inclinada (fazendo 45° em relação à amostra) diretamente sobre a amostra. Este procedimento de ensaio não está em concordância com o que vem descrito na norma ISO 10140-5. Segundo esta norma, quando se pretende medir o isolamento sonoro a sons de condução aérea numa transmissão vertical em que a fonte está na câmara de cima, esta fonte sonora deve de estar pelo menos

a 1,5m acima do pavimento. Além da posição fonte sonora, os ensaios às soluções de pavimentos sem teto foram feitos com apenas dois painéis difusores na câmara recetora.

Nos ensaios aos pavimentos com teto foram feitos dois tipos de medições: com a fonte inclinada sobre a amostra e em cima da bordadura na câmara emissora. No último dia de ensaios foi montada e foram feitos novos ensaios ao pavimento existente sem teto (denominado de E7 no capítulo 6). As Fig.9.18. e Fig.9.19. apresentam as várias medições realizadas à solução E7, a solução existente de pavimento sem teto:

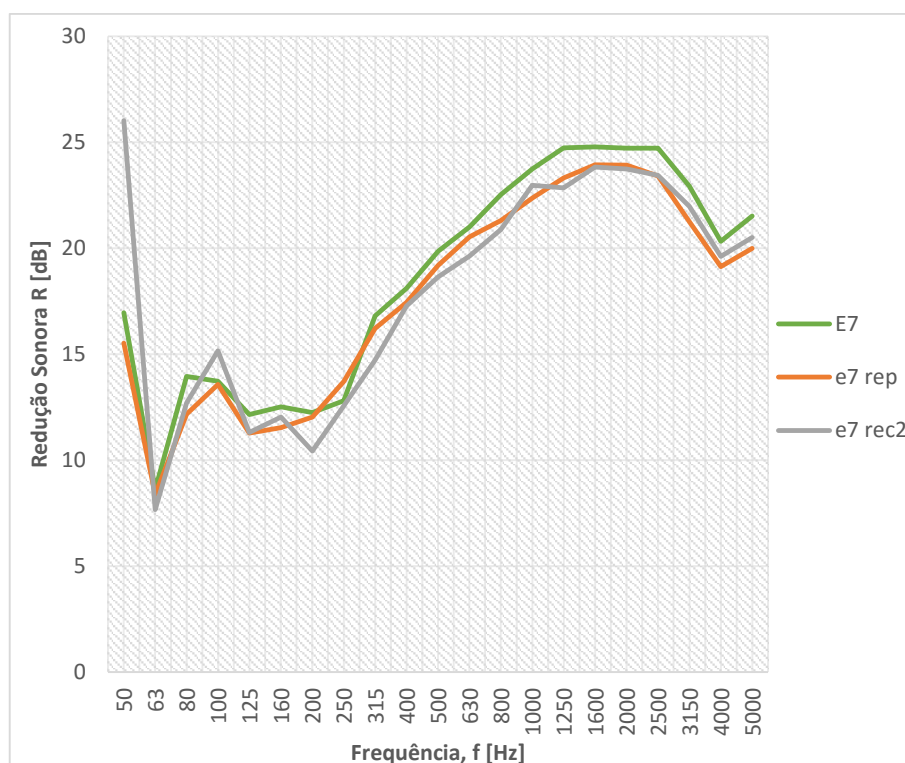


Fig.9.18. – Espectros da redução sonora por bandas de oitava dos diferentes ensaios à solução E7

Na Fig.9.18, o espectro E7 (R_w de 22dB) corresponde ao ensaio ao pavimento existente sem teto, medição realizada com fonte inclinada sobre o pavimento, o espectro e7 rep (R_w de 22dB) corresponde ao mesmo pavimento com fonte inclinada sobre pavimento e 5 difusores na câmara recetora e o espectro e7 rec2 (R_w de 21dB) corresponde ao mesmo pavimento com a fonte sonora na vertical, em cima da bordadura da câmara emissora, aproximadamente a 0,5m acima da amostra, e 5 difusores na câmara recetora. Ora, como se pode verificar, os índices de redução sonora R_w são os mesmos e os espectros são semelhantes, com algumas diferenças nas altas e baixas frequências, possivelmente devido à vibração do pavimento causada pela fonte sonora e a modos próprios de vibração.

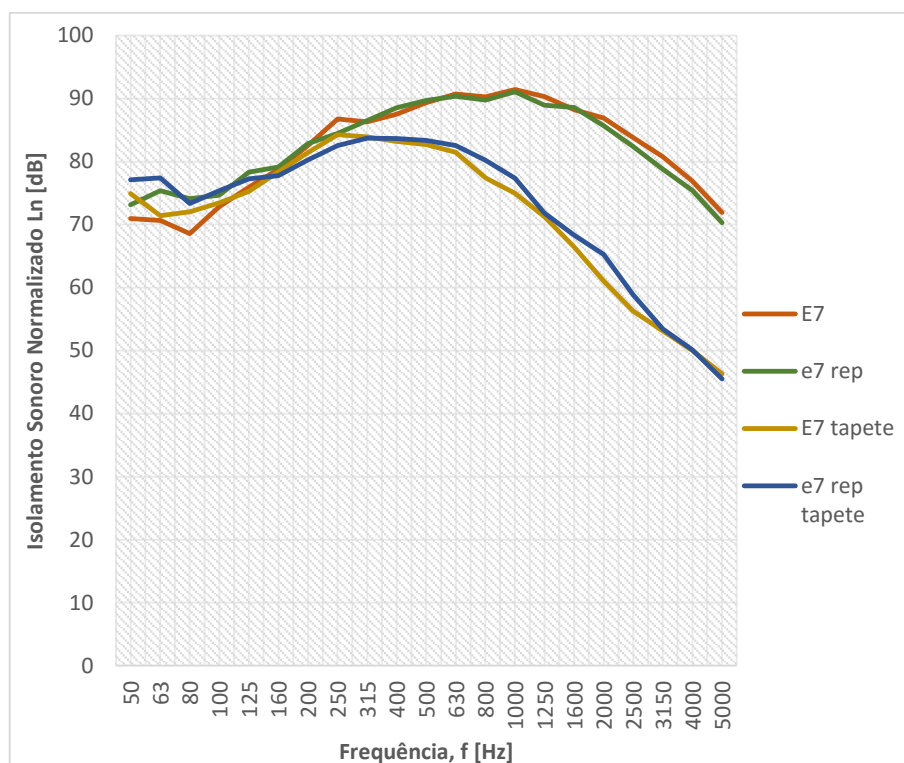


Fig.9.19. – Espectros dos níveis de pressão sonora a sons de percussão por bandas de oitava dos diferentes ensaios à solução E7

Na Fig.9.19, o espectro E7 corresponde aos ensaios ao pavimento existente sem teto com 2 difusores na câmara recetora e os espectros e7 rep correspondem aos ensaios do mesmo pavimento, mas com 5 difusores na câmara recetora.

Os índices de nível de pressão sonora $L_{n,w}$ são 93 e 92dB para E7 e e7 rep, respetivamente, e 78 e 79dB para E7 tapete e e7 rep tapete, respetivamente. Conclui-se que nos sons a percussão as diferentes posições da fonte e o número de difusores têm pouca interferência nos resultados

Dos dados resultantes dos ensaios às soluções com teto (denominados de E11, E14 e E15 no capítulo 6) feitos com a fonte sonora sobre a bordadura da câmara emissora, correspondentes na Fig.9.20. a e11-2, e14-2 e e15-2, e com a fonte inclinada diretamente sobre o pavimento a ensaiar e cinco difusores na câmara recetora, correspondente na Fig.9.3. a e11, e14 e e15, constata-se que as diferentes posições da fonte sonora e o número de difusores têm pouca interferência nos resultados da redução sonora. As diferenças entre os índices de redução sonora entre os ensaios e11, e14 e15 ($R_w=55$ dB) e os ensaios e11-2, e14-2 e e15-2 ($R_w=54$ dB) é 1dB, pouco significante.

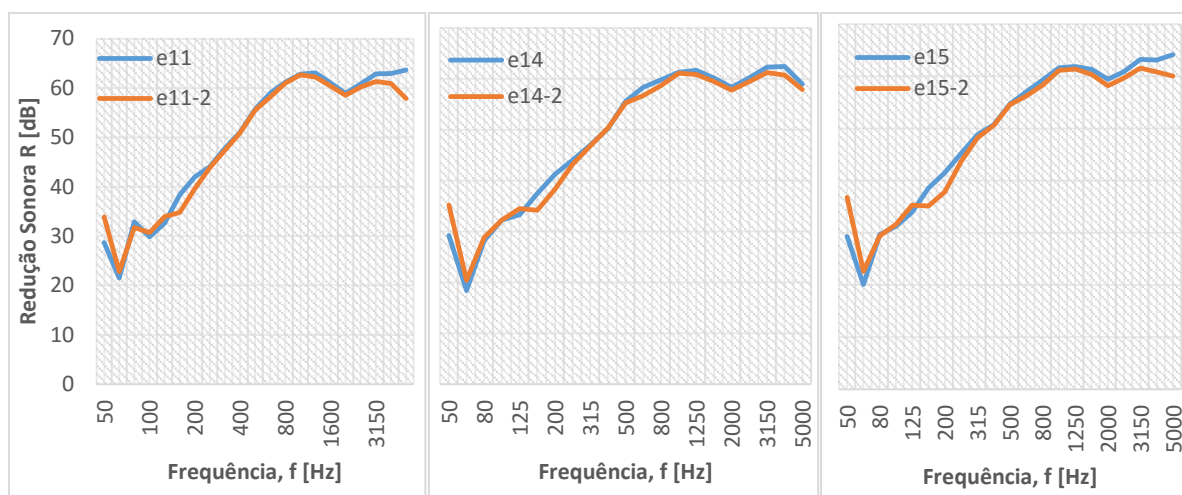


Fig.9.20. – Espectros da redução sonora por bandas de oitava dos diferentes ensaios às soluções E11, E14 e E15

9.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Este trabalho permite conhecer algumas propostas de reabilitação à base de painéis compósitos de madeira e cimento de soluções construtivas da casa clássica do Porto burguês. No entanto, pretende-se realçar a possibilidade de desenvolvimento de outras soluções de reabilitação e a existência de diferentes metodologias de caracterização que permitem aprofundar melhor o conhecimento acústico das soluções existentes e das novas soluções. Por este motivo, são evidenciadas as seguintes propostas de desenvolvimentos futuros:

- O método de investigação utilizado neste trabalho é o método científico, porém, outros métodos de investigação se adaptariam de forma igual ou melhor. A utilização do método indutivo, por exemplo, na investigação possivelmente abriria mais à exploração, possibilitaria uma investigação mais prática, a realização de experiências e tentativa de explicação e formulação de teorias;
- A análise e discussão de resultados relativos ao isolamento sonoro por condução aérea foi feita de acordo com resultados de modelação teórica baseada em Sharp, Cremer e Fahy. Este método tem uma eficiência na previsão da transmissão sonora baixa em comparação com métodos mais complexos, mas mais demorosos. A aplicação de um método teórico como é o caso do método dos elementos finitos (FEM) traria resultados mais fidedignos e resultaria numa análise mais realista e mais detalhada;
- A realização de ensaios laboratoriais às restantes soluções de paredes interiores e coberturas permitiria validar ou invalidar os resultados obtidos teoricamente neste trabalho.
- Realização de ensaios às soluções de pavimentos sem teto com a fonte sonora respeitando as condições da norma;
- Investigação da incapacidade do modelo teórico baseado em Sharp, Cremer e Fahy de se correlacionar com os resultados obtidos dos ensaios laboratoriais;
- Investigação da potencialidade da cortiça e de compósitos à base de cortiça como apoios resilientes na reabilitação acústica de pavimentos;
- Desenvolvimentos de soluções de tetos falsos, pavimentos sobre elevados e de paredes exteriores com a introdução de painéis compósitos de madeira e cimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Environment, DG. 2014. "Health implication of road, railway and aircraft noise in the European Union". Acedido a 15-02-2016. http://ec.europa.eu/environment/noise/health_effects_en.htm.
- [2] Organization, World Health. 2016. "Data and statistics". Acedido a 15/02/2016. <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/data-and-statistics>.
- [3] Domingues, Álvaro. 2014. O Porto e rio Douro: a construção de uma nova relação
- [4] Oliveira, Ernesto Veiga de e Fernando Galhano. 1992. *Arquitetura tradicional portuguesa*. Lisboa: Dom Quixote.
- [5] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Instituto Nacional de Estatística. 2013. *O Parque Habitacional e a sua Reabilitação. Análise e Evolução - análise e evolução 2001-2011*. Estatísticas Oficiais.
- [6] Andersen, Hanne e Brian Hepburn. 2015. *Scientific Method*. Editado por Edward N. Zalta (ed.). Winter 2015 Edition ed. Vol. 2016: Stanford Encyclopedia of Philosophy.
- [7] Addis, Bill. 2009. *A Brief History of Design Methods for Building Acoustics*
- [8] Carvalho, António Pedro Oliveira de. 2016. *Texto de Apoio à Disciplina de Acústica Ambiental e de Edifícios*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [9] Dias, Ricardo Manuel de Abreu. 2009. "Análise comparativa dos métodos normalizados de previsão da transmissão sonora por via aérea ", Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- [10] Patricio, Jorge Viçoso. 1995. *Métodos de caracterização da propagação de estímulos sonoros em edifícios*.
- [11] He, Jimin e Zhi-Fang Fu. 2001. *Modal analysis*. Butterworth-Heinemann.
- [12] Sousa, Nelson ricardo Vieira de. 2008. "Caracterização do comportamento acústico a sons de percussão de soluções à base de espumas de poliuretano", Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto.
- [13] Quaresma, Susana Rosa. 2010. "Modelação do Campo Sonoro ", Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- [14] Patrício, Jorge Viçoso. 2010. *Acústica nos Edifícios*. Editado por Verlag Dashofer.
- [15] Santos, P. e A. Tadeu. 2002. "Acoustic insulation provided by a single wall separating two contiguous tunnel via BEM". *Journal of Sound and Vibration*.
- [16] Fischer, Michael. 2006. *The Statistical Energy Analysis (SEA)*. JASS 2006 in St. Petersburg: Michael Fischer.
- [17] Nilton G. Colinas, José Maria C. dos Santos. 1999. "Caracterização de propriedades vibroacústicas de estruturas usando holografia acústica de campo próximo". Comunicação apresentada em XV Congresso Brasileiros de Engenharia Mecânica, em São Paulo. 22 -26 Novembro de 1999.
- [18] Normalização, Comité Europeu de. 2000a. *EN ISO 12354 "Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 1: Airborne sound insulation between rooms"*.
- [19] Barbu, Marius C., Roman Reh e Mark Irle. 2014. *Research Developments in Wood Engineering and Technology*. Vol. Chapter 1, Wood-Based Composites

- [20] Matoski, Adalberto e Rodrigo Scoczynski Ribeiro. 2016. "Evaluation of the acoustic performance of a modular construction system: Case study". *Applied Acoustics* no. 106:105-112. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X16000050>.
- [21] Macêdo, Alcebíades Negrão, Alberto Alexandre Costa e Souza e Bernardo Borges Pompeu Neto. 2012. "Chapas de cimento-madeira com resíduos da indústria madeireira da Região Amazônica". *Ambiente Construído* no. 12:131-150. http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212012000200009&nrm=iso.
- [22] Wolfe, Ronald W. e Agron Gjinolli. 1996. "Cement-bonded wood composites as an engineering material". Comunicação apresentada em Proceedings of the 1996 Conference on the Use of Recycled Wood and Paper in Building Applications, September 9, 1996 - September 11, 1996, em Madison, WI, USA.
- [23] Stark, Nicole M., Zhiyong Cai e Charles Carll. 2010. Wood Handbook, Chapter 11: Wood-Based Composite Materials-Panel Products- Glued-Laminated Timber, Structural Composite Lumber, and Wood-Nonwood Composite Materials. Article, editado por Forest Service Dept. of Agriculture, Forest Products Laboratory. General Technical Report (GTR). http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr190/chapter_11.pdf.
- [24] Iwakiri, Setsuo, Leandro Soares da Silva, Rosilani Trianoski, Ghislaine Miranda Bonduelle e Vinicius Yurk da Rocha. 2012. "Avaliação do potencial de utilização da madeira de Schizolobium amazonicum "Paricá" e Cecropia hololeuca "Embaúba" para produção de painéis cimento-madeira". *CERNE* no. 18:303-308. http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-77602012000200015&nrm=iso.
- [25] Jorge, F. C., C. Pereira e J. M. F. Ferreira. 2004. "Wood-cement composites: a review". *Holz als Roh- und Werkstoff* no. 62 (5):370-377. <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-004-0501-2>.
- [26] Investwood. 2016c. "Viroc". Acedido a 02/03/2016. <http://www.viroc.pt/content.aspx?menuid=97&eid=147>.
- [27] Investwood. 2016a. "Dossier Técnico". Acedido a 11/04/2016. http://www.viroc.pt/ResourcesUser/Nova_Gama_Viroc/Viroc_Dossier_Tecnico_PT.pdf.
- [28] Pinto, Vítor Hugo dos Santos de Jesus. 2010. "Soluções de Paredes Leves Incorporando Placas de Aglomerado Madeira/Cimento para Edifícios de Pequeno Porte", Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto.
- [29] Ferreira, Rosa Alexandra Pinto. 2010. "Comportamento Acústico de Componentes da Construção à Base de Aglomerado de Fibras de Madeira Cimento ", Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto.
- [30] AMROC. 2016. Acedido a 16/02/2016. <http://www.amroc.de/>.
- [31] CETRIS. 2016. Acedido a 16/02/2016. <http://www.cetris.cz/>.
- [32] Euronit. 2016. "Duripanel". Acedido a 13-04-2016. <http://www.euronit.es/sistemas/construccion-seca/duripanel>.
- [33] Indústrias de Madeira e Cimento, S.A. 2010. VIROC- Soluções Contemporâneas.
- [34] Investwood. 2013. "Viroc". Acedido a 12-04-2016. <http://www.viroc.pt/content.aspx?menuid=22&eid=153>.
- [35] Investwood. 2016b. "Quem somos". Acedido a 12-04-2016. <http://www.investwood.pt/content.aspx?menuid=2>.

- [36] Oliveira, Bruno. 2010. "Investwood salva IFM/Platex de Tomar". Acedido a 12-04-2016. <http://www.oriabatejo.pt/2010/09/09/investwood-salva-ifmplatex-de-tomar/>.
- [37] Vilela, Maria Isabel Marques. 2013. "A madeira na construção de habitação coletiva", Faculdade de comunicação, artes, arquitectura e tecnologias da informação, Universidade Lusófona do Porto.
- [38] Ferreira, João Manuel Monteiro. 2014. "A casa para uma cidade intensa -Tipologia portuense na forma da cidade", Departamento de Arquitectura da FCTUC.
- [39] Rocha, Patrícia Andreia Ventura Pinto Fernandes. 2014. "A manutenção de edifícios no processo de conceção arquitectónica - modelo de apoio á decisão", Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto.
- [40] Queirós, Dóris e Rui Calejo Rodrigues. 2013. *Comportamento acústico de edifícios com valor patrimonial - Manual técnico*. Editado por Gequaltec. 1ª edição ed.: Gequaltec.
- [41] Teixeira, Joaquim José Lopes. 2004. "Descrição do sistema construtivo da casa burguesa do Porto entre os séculos XVII e XIX". Prova de aptidão pedagógica e capacidade científica, Faculdade de Arquitectura, Universidade do Porto.
- [42] Ballagh, K. O. 2004. "Accuracy of Prediction Methods for Sound Transmission Loss ". Comunicação apresentada em The 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering em Prague, Czech Republic.
- [43] David A. Bies, Colin H. Hansen. 2003. *Engineering Noise Control: Theory and Practice*. Taylor & Francis e-Library.
- [44] Normalização, Comité Europeu de. 2000b. "EN ISO 12354 "Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 2: Impact sound insulation between rooms"".
- [45] Santos, Carlos A. Pina dos e Luís Matias. 2006. *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*. Editado por LNEC. ITE 50.
- [46] Huang, Peng, Ming Gu, Amir Mirmiran e Arindam Gan Chowdhury. 2009. "FEM analysis of tile roofs under simulated typhoon impact". Comunicação apresentada em The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, em Taipei, Taiwan. November 8-12.
- [47] Composites, Amorim Cork. 2016. Acousticork. Em *Reinventing sustainable green and acoustic insulation*.

REFERÊNCIAS DE FIGURAS

- [1] Imperialum. 2016. “Conceitos gerais de acústica”. Acedido a 26-02-2016. <http://www.imperialum.com/cms/wp-content/uploads/2014/08/sons.gif>
- [2] Mateus, Diogo. 2008. “Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído”. Acedido a 26-02-2016. <https://paginas.fe.up.pt/~earpe/conteudos/ARE/Apontamentosdadisciplina.pdf>
- [3] Marius C. Barbu, Roman Reh, Mark Irle. 2014. Research Developments in Wood Engineering and Technology. Vol. Chapter 1, Wood-Based Composites
- [4] Faria, Gonçalo, Carlos Chastre, Válder Lúcio e Ângela Nunes. 2013. "Compression behaviour of short columns made from cement-bonded particle board". Construction and Building Materials no. 40:60-69. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812007507>.
- [5] Investwood. 2016. Acedido a 11-04-2016. <http://www.viroc.pt/content.aspx?menuid=22&eid=153>
- [6] Investwood. 2016a. "Dossier Técnico". Acedido a 11-04-2016. http://www.viroc.pt/ResourcesUser/Nova_Gama_Viroc/Viroc_Dossier_Tecnico_PT.pdf
- [7] AdePorto, Agência de Energia do Porto e Laboratório de Física das Construções LFC. 2010. Reabilitação de Edifícios do Centro Histórico do Porto. Guia de Termos de Referência para o Desempenho Energético-Ambiental. Editado por SRU - Sociedade de Reabilitação Urbana da Baixa Portuense Porto Vivo, S.A.
- [8] Teixeira, Joaquim José Lopes. 2004. "Descrição do sistema construtivo da casa burguesa do Porto entre os séculos XVII e XIX". Prova de aptidão pedagógica e capacidade científica, Faculdade de Arquitetura, Universidade do Porto.
- [9] Queirós, Dóris Mafalda Dias. 2010. "Caracterização do comportamento acústico de edifícios reabilitados", Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto.
- [10] Freitas, Vasco Peixoto de. (2012). Manual de Apoio ao Projecto de Reabilitação de Edifícios Antigos. Pg. 4
- [11] Ballagh, K. O. 2004. "Accuracy of Prediction Methods for Sound Transmission Loss ". Comunicação apresentada em The 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering em Prague, Czech Republic.
- [12] Halliwell, R.E., T.R.T. Nightingale, A.C.C. Warnock e J.A. Birta. 1998. “Gypsum Board Walls: Transmission Loss data”. National Research Council of Canada, Internal Report No. 761.
- [13] A.C.C. Warnock & J.A. Birta “Detailed Report for Consortium on Fire Resistance and Sound Insulation of Floors: Sound Transmission and Impact Insulation Data in 1/3 Octave Bands”. National Research Council of Canada, Internal Report No. 811 (2000).
- [14] David A. Bies, Colin H. Hansen. 2003. Engineering Noise Control: Theory and Practice. Taylor & Francis e-Library

ANEXO A – BOLETINS DE ENSAIO

ANEXO B – PROPOSTA DE CATÁLOGO